

基于热像仪灰度图像的目标红外辐射特性测量方法

朱院院 慕巍 许丽蓉 邓丽娜 史雷蕾

Measurement method of infrared radiation characteristics of targets based on grayscale images of thermal imager

ZHU Yuanyuan, MU Wei, XU Lirong, DENG Lina, SHI Leilei

引用本文:

朱院院, 慕巍, 许丽蓉, 等. 基于热像仪灰度图像的目标红外辐射特性测量方法[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1090–1096. DOI: 10.5768/JAO202546.0503004

ZHU Yuanyuan, MU Wei, XU Lirong, et al. Measurement method of infrared radiation characteristics of targets based on grayscale images of thermal imager[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1090–1096. DOI: 10.5768/JAO202546.0503004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0503004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

目标辐射特性现场校准用大面积黑体辐射源技术研究

Research on technology of large area blackbody radiation source used in field calibration for target radiation characteristics

应用光学. 2021, 42(2): 292–298 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203001>

红外告警设备外场标定方法

Field calibration method of infrared warning equipment

应用光学. 2024, 45(6): 1164–1169 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601008>

迎头方向隐身导弹红外辐射特性分析

Infrared radiation characteristics of head-on stealth missile

应用光学. 2022, 43(1): 41–44 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0101007>

基于灰度图差分梯度的雾化角测量方法

Spray angle measurement method based on grayscale image differential gradient

应用光学. 2022, 43(5): 929–934 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0503001>

真空条件下低温红外辐射测量技术研究

Research on low-temperature infrared radiation measurement technology under vacuum condition

应用光学. 2020, 41(4): 730–736 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0406002>

精密红外辐射计测量模块研究

Research on measurement module of precision infrared radiometer

应用光学. 2022, 43(4): 738–743 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0404004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1090-07

引用格式: 朱院院, 慕巍, 许丽蓉, 等. 基于热像仪灰度图像的目标红外辐射特性测量方法 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1090-1096.

ZHU Yuanyuan, MU Wei, XU Lirong, et al. Measurement method of infrared radiation characteristics of targets based on grayscale images of thermal imager[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1090-1096.



在线阅读

基于热像仪灰度图像的目标红外辐射特性测量方法

朱院院, 慕巍, 许丽蓉, 邓丽娜, 史雷蕾

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对现役装备的热像仪不能获取目标辐射温度信息的问题, 研究了一种利用热像仪视频图像, 简易获取目标红外辐射特性的测量方法。固定热像仪积分时间, 通过设置增益、偏置参数, 采集黑体靶标不同温度的灰度图像, 建立热像仪灰度与温度模型。采集目标图像后, 运用模型反演目标辐射温度, 并将其伪彩色可视化。根据目标辐射温度, 可相应计算目标辐射亮度、辐射强度等红外辐射信息。最后, 通过热像仪试验验证了该方法的可行性。试验结果表明: 室内试验中, 在一定增益偏置条件下, 反演目标辐射温度的绝对误差在 4℃ 以内, 相对误差在 14% 以下; 外场试验中, 反演目标辐射温度误差较大, 模型还需进一步完善。该方法操作可行, 具有较强的应用前景。

关键词: 热像仪; 辐射特性; 温度反演

中图分类号: TN215

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0503004

Measurement method of infrared radiation characteristics of targets based on grayscale images of thermal imager

ZHU Yuanyuan, MU Wei, XU Lirong, DENG Lina, SHI Leilei

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problem that thermal imager of existing in-service equipment cannot obtain target radiation temperature information, a simple measurement method for obtaining target infrared radiation characteristics using video images of thermal imagers is studied. By setting the gain and the level parameters in fixed integration time of thermal imager, the gray images of the blackbody at different temperatures are collected, and the gray and temperature models of the thermal imager are established. After collecting the target image, the target radiation temperature is retrieved by the model, and the target temperature is displayed in pseudo color. According to the target radiation temperature, the infrared radiation information such as target radiation brightness and radiation intensity can be calculated accordingly. The feasibility of this method is verified in the thermal imager experiment. The results show that the absolute error of retrieving the target radiation temperature is less than 4℃ and the relative error is less than 14% under the condition of certain gain and level. The error of target radiation temperature is large in field experiment. The model needs to be further improved. However, this method is feasible and has a strong application prospect.

Key words: thermal imager; radiation characteristics; temperature retrieval

引言

目标红外辐射特性研究在军事领域具有广泛

而深远的意义, 是现代战争中信息化建设的重要内容之一^[1-3]。广泛采集潜在威胁目标的红外辐射特

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2025-07-07

第一作者: 朱院院, E-mail: zhuyuanme@126.com

性,开展目标红外辐射特性研究,构建目标红外辐射特性数据库,以提升未来战场态势感知与生存能力,实现对敌方目标有效探测、侦察和精准打击。

目标红外辐射特性研究是现代战争信息化建设的重要内容之一。红外探测技术可全天候获取战场目标的热特征信息,为态势感知、精确打击和隐身对抗提供关键数据支撑^[4-5]。通过红外成像、特征提取与智能识别,能有效提升目标探测、分类与跟踪能力,并融入多源情报体系。同时,分析红外辐射规律可优化武器装备的隐身设计,发展针对性干扰手段。掌握红外特性对构建数字化战场,实现“发现即摧毁”的作战模式具有战略意义,是提升信息化作战效能的关键技术基础。

目标红外辐射特性测量主要是利用红外热像仪和红外光谱辐射计构成的测量平台,通过静态或动态跟踪方式获取目标的红外辐射强度和红外辐射光谱分布等红外特性,其中热像仪采用测温热像仪。但传统监视成像主要是利用热像仪输出的图像数据判断目标是否存在以及判断目标运动轨迹等,并不具备测温功能。若能从该热像仪视频图像中快速简捷地获取目标的辐射特性,这不仅能辅助目标识别,而且能大大节省测量平台成本,具有较高的经济效益^[6-7]。

1 红外辐射特性测量原理

红外辐射特性测量的基本原理是基于普朗克黑体辐射定律与光电转换原理,利用物体热辐射与温度之间的物理关系实现定量化测量。红外热像仪利用目标表面的热辐射差异进行成像,探测器上的每个像素接收到不同温度的红外辐射,通过光电效应产生电压或电流信号,经过读出电路的处理,最后形成与目标各点温度相对应的灰度图,不同的灰度图对应不同的温度和辐射通量^[8]。

目标的红外辐射特性测量主要包括3个步骤,即红外热像仪的辐射定标、目标探测及目标辐射特性反演。目标辐射特性包括目标辐射温度、辐射亮度、辐射强度等^[8]。

红外热像仪的辐射定标是建立红外热像仪光学入瞳辐射量与图像显示灰度之间的关系,利用已知的红外辐射源对准需要定标的红外热像仪,根据不同的辐射输出信号,建立红外热像仪的光学入瞳辐射量与红外热像仪显示输出之间的定量关系^[6-7,9]。

在热像仪的线性响应范围内,红外热像仪输出的灰度值与输入的辐射亮度之间的关系如式(1)所示:

$$g = \alpha L(T) + D_0 \quad (1)$$

式中: g 代表红外热像仪视频图像的灰度输出值(无量纲单位); D_0 为探测器暗电流引起的固定偏置; α 为热像仪的响应度(单位为 $\text{sr} \cdot \text{m}^2/\text{W}$),与探测器光电转换的增益密切相关; $L(T)$ 为热像仪光学入瞳处的辐射亮度(单位为 $\text{W}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$), T 为辐射温度。

根据普朗克黑体辐射定律,黑体的辐射亮度与辐射温度的关系为^[7,10-11]

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

式中: $C_1 = 3.74 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \mu\text{m}^2$; $C_2 = 1.44 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; λ_1 、 λ_2 分别为波长 λ 的上限和下限。若已知目标辐射温度,相应的目标辐射亮度可根据式(2)计算。

为了减少误差,需考虑目标发射率。假设目标发射率在波段内变化平缓,相应的目标辐射亮度测量模型为^[12]

$$L(T) = \frac{\bar{\varepsilon}}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} d\lambda \quad (3)$$

式中 $\bar{\varepsilon}$ 为目标平均发射率。在实际应用中,通过子波段划分和表面状态参数修正等方式,可有效补偿平均发射率下波长与表面状态对发射率的影响。

在固定的试验室内,确保试验室的温度、湿度和气压保持相对稳定。将高精度面源黑体置于热像仪入瞳处,覆盖热像仪整个视场;设置热像仪积分时间、采样频率等参数;记录面源黑体不同温度点热像仪输出图像的灰度值。根据获得的黑体各温度点对应的图像平均灰度值,拟合温度-灰度定标曲线,或辐射亮度-灰度定标曲线。通过该曲线可以求取不同灰度值下的目标辐射信息^[13-14]。

外场应用时,需考虑大气衰减和背景产生的红外辐射,在红外热像仪的线性响应范围内,目标辐射测量模型^[7]为

$$g = a(\tau L(T) + L_{\text{path}}) + D_0 \quad (4)$$

式中 τ 、 L_{path} 分别为被测目标与红外热像仪之间的大气透过率和大气路径辐射,这2个参数可通过 modtran 软件设置相关参数计算获取。相应的辐射亮度为

$$L(T) = \frac{(g - D_0)/a - L_{\text{path}}}{\tau} \quad (5)$$

当辐射路径较长时,为减少误差,需分段计算大气透过率和大气路径辐射^[13]。假设辐射路径分为 n 段,则总透过率和总路径辐射分别为

$$\tau_{\text{total}}(\lambda) = \prod_{i=1}^n \tau_i(\lambda) \quad (6)$$

$$L_{\text{path,total}} = L_{\text{path},1} + \tau_1 L_{\text{path},2} + \tau_1 \tau_2 L_{\text{path},3} + \dots + \tau_1 \tau_2 \dots \tau_{n-1} L_{\text{path},n} \quad (7)$$

式中: τ_{total} 为整个路径总的大气透过率; τ_i 为第 i 段的大气透过率; $L_{\text{path,total}}$ 为总的大气路径辐射; $L_{\text{path},i}$ 的第 i 段的大气路径。

目标的辐射强度 I 可根据下式计算^[15]:

$$I = L(T) \times S \quad (8)$$

式中 S 表示目标辐射面积。通过热像仪视场、目标与热像仪之间的距离, 按照几何关系即可计算出目标在测量方向上的辐射面积。即采用闭合曲线对目标的边界进行连接, 依据式(9)计算目标辐射面积 S , 表达式如下:

$$S = \frac{N \cdot r^2}{\tan(a/f) \cdot \tan(b/f)} \quad (9)$$

式中: N 为目标所占像素数; r 为目标距离; a 、 b 为探测器尺寸; f 为光学系统焦距。

2 热像仪视频图像采集及数据分析

热像仪视频图像获取目标辐射温度的过程如图 1 所示, 整个过程主要分为 3 步。

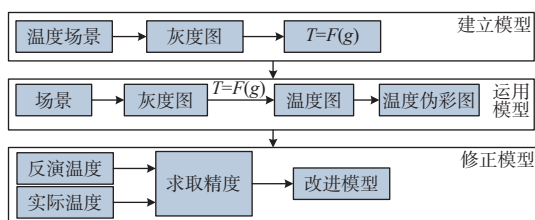


图 1 获取目标辐射温度的过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of obtaining target radiation temperature process

第一步, 建立数学模型。通过设定增益、偏置参数, 采集黑体靶标不同温度的灰度图像即可建立图像灰度与温度的模型关系 $T = F(g)$; 第二步, 运用模型求解目标辐射温度。采集场景图像, 根据所建立的灰度温度模型, 由图像灰度解算出相应的辐射温度, 再对辐射温度图进行伪彩色显示; 第三步, 修正模型。将反演的目标辐射温度与实际温度进行对比分析, 根据精度完善第一步所建立的 $T = F(g)$ 模型。

1) 建立数学模型

试验室搭建的热像仪标定示意图如图 2 所示。首先, 将综合准直测试系统的黑体靶标设置为方块靶, 并设置黑体温度; 然后, 当黑体温度到达设定温度时, 通过操控终端的热像仪操控软件

和视频采集软件采集图像; 最后, 采集完成后, 利用 Matlab 自编的 GUI 程序进行试验数据分析。

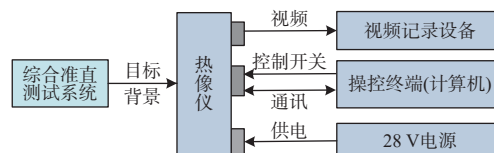


图 2 热像仪标定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal imager calibration

在综合准直测试系统中, 选取靶标为方形靶, 设置黑体温度参数, 根据所选热像仪的多次尝试, 试验温度范围选择为 $10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变换, 每次递增 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了减少热像仪视场内不同区域反演温度的差别, 将热像仪成像区域划分为 9 个区域。目前先将方靶居于视场中心, 后期可尝试将靶标置于视场不同位置, 对推算的模型做进一步完善。模型使用黑体中心靶标做室内标定时, 对于探测器非均匀性和长时间运行暗偏置漂移引起的误差, 分别采用两点标定法和遮光暗帧图像均值来进行补偿。

采集不同增益和偏置下的图像, 利用 Matlab 编写的 GUI 程序进行数据分析。加载图像后, 按照选择区域统计图像的位置坐标及灰度信息。根据统计后的灰度值, 剔除灰度过饱和的图像, 从而提高推导模型的准确性。

根据增益、偏置参数的不同设置, 建立相应参数下的函数模型, 如表 1 所示。其中 L 表示偏置, G 表示增益, T 表示温度, g 表示图像灰度。

表 1 相应参数条件下 $T=f(g)$ 函数模型

Table 1 Model of $T=f(g)$ function under corresponding parameter conditions

L	G	函数
0	2	$T = -0.000\ 9g^3 + 0.129\ 2g^2 - 8.031\ 4g + 149.573\ 3$
0	4	$T = 0.000\ 3g^3 - 0.041\ 5g^2 + 4.079g - 167.703\ 6$
0	6	$T = 0.002g^3 - 0.299\ 1g^2 + 22.106g - 639.297\ 6$
0	8	$T = 0.003\ 2g^3 - 0.457\ 3g^2 + 31.267\ 5g - 815.956\ 6$
0	10	$T = 0.002\ 6g^3 - 0.341\ 1g^2 + 20.962\ 9g - 473.767\ 3$
4	6	$T = 0.002\ 1g^3 - 0.300\ 3g^2 + 21.756\ 4g - 620.004\ 7$
4	6	$T = 0.001\ 1g^3 - 0.157\ 3g^2 + 11.092\ 8g - 308.605\ 5$
8	6	$T = 0.003\ 1g^3 - 0.464\ 6g^2 + 34.251\ 9g - 989.994\ 2$
8	6	$T = 0.000\ 6g^3 - 0.086\ 6g^2 + 6.126\ 4g - 171.635$
16	6	$T = -0.000\ 1g^3 + 0.023\ 7g^2 - 1.510\ 2g + 17.506\ 8$
16	6	$T = 0.000\ 2g^3 - 0.033\ 1g^2 + 2.738\ 6g - 84.835\ 9$
32	6	$T = 0.005\ 6g^3 - 0.879\ 5g^2 + 68.447\ 2g - 2\ 109.119\ 5$
32	6	$T = 0.000\ 4g^3 - 0.050\ 7g^2 + 3.544\ 8g - 87.958\ 4$

根据表 1 所建立的各个参数条件下的数学模型, 通过试验室实际采集图像的目标温度, 与利用数学模型反演的温度进行对比分析, 模型精度曲线如图 3 所示。

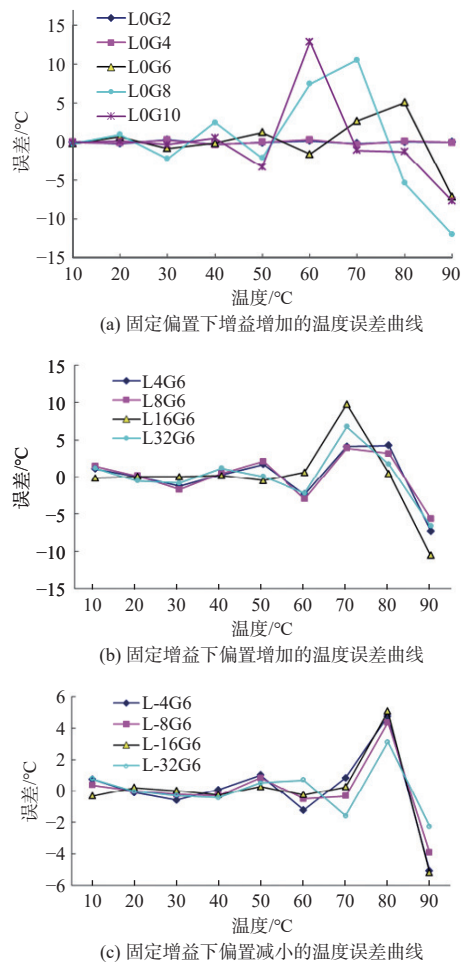


图 3 不同参数下的模型精度曲线

Fig. 3 Model accuracy curves under different parameters

由图 3 可以看出, 10 ℃~50 ℃ 之间的误差一般在 4 ℃ 以下。从固定偏置下增益增加的温度误差曲线可看出, 随着增益增加, 温度升高时所产生的误差越来越大, 这表明图像的灰度随着增益增大而增大, 而灰度又反作用于温度, 从而造成温度偏差较大。固定增益下, 偏置一定范围内误差较小, 随着偏置远离中心范围的增加, 误差也随之增大。

2) 运用建立的数学模型反演物体辐射温度

根据固定参数下的热像仪辐射温度函数, 推算采集目标灰度图所对应的辐射温度图。选取 L32G6 参数下所采集的不同温度目标的灰度图, 如图 4 所示。



图 4 不同温度的目标灰度图

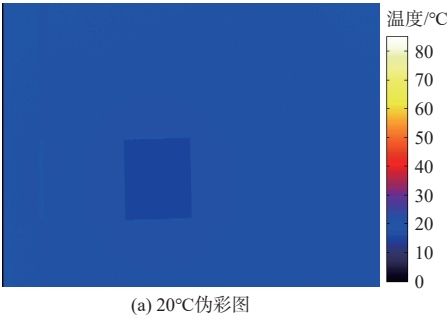
Fig. 4 Gray images of targets at different temperatures

不同温度的目标灰度图按照表 1 进行温度转换, 温度值变化较小的动态范围内, 人眼难以从这些图像中获取丰富的信息。为了增强显示图像的层次, 提高人眼分辨力, 对转换的图像进行伪彩色显示, 从而达到图像增强的效果。伪彩色显示的过程大致为, 首先确定温度图最大值、最小值; 然后将温度值范围分成 24 等分, 按照图 5 的 24 色等色差颜色路径进行颜色映射, 最终进行伪彩色显示, 结果如图 6 所示。从图 6 中可直观地看出目标的大致辐射温度。



图 5 24 色等色差颜色路径

Fig. 5 24 colors equal color different color path



(a) 20℃伪彩图



(b) 30℃伪彩图



(c) 40℃伪彩图

图 6 不同辐射温度的伪彩色图

Fig. 6 Pseudo color images of different radiation temperatures

在试验过程中,选取一组参数来采集一瓶温水灰度图像,如图 7 所示,并按照表 1 进行结算,得到相应的温度图。然后进行伪彩色显示,如图 8 所示。从图 8 中能快速读出温水的辐射温度大概为 45 ℃。根据辐射温度,可相应计算出其他辐射特性,如表 2 所示。

3) 黑体验证的数据采集及数据分析

通过黑体圆形靶标验证热像仪标定的矩阵关系,缺失的温度点根据对应的灰度值通过多项式



图 7 瓶装水灰度图

Fig. 7 Gray image of bottled water



图 8 瓶装水辐射温度伪彩图

Fig. 8 Pseudo color image of bottled water radiation temperature

表 2 固定条件下瓶装水的红外辐射特性

Table 2 Infrared radiation characteristics of bottled water under fixed conditions

$T/^\circ\text{C}$	$L/(\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	S/m^2	$I/(\text{W}/\text{sr})$
44.58	33.804	2.21×10^{-3}	0.074 6

插值求取,黑体的辐射温度选取了 4 个温度点。以黑体的辐射温度值为真值,分别计算不同参数条件下反演靶标目标辐射温度的绝对误差和相对误差,如表 3 所示。

表 3 不同参数下反演辐射温度与黑体实际辐射温度对比分析

Table 3 Comparative analysis table of inverted radiation temperature and actual blackbody radiation temperature under different parameters

参数		黑体25 ℃			黑体30 ℃			黑体35 ℃			黑体40 ℃		
L	G	辐射 温度/℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%	辐射 温度/℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%	辐射 温度/℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%	辐射 温度/℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%
0	2	27.6	2.6	10.4	33.2	3.2	10.7	38.7	3.7	10.6	40.8	0.8	2.0
0	4	27.5	2.5	10.0	32.8	2.8	9.3	36.0	1	2.9	40.3	0.3	0.7
0	6	27.8	2.8	11.2	32.1	2.1	7.0	35.7	0.7	2.0	40.4	0.4	1.0
0	8	28.1	3.1	12.4	31.7	1.7	5.7	36.2	1.2	3.4	41.3	1.3	3.2
0	10	28.1	3.1	12.4	32.2	2.2	7.3	36.3	1.3	3.7	41.1	1.1	2.8
4	6	28.5	3.5	14.0	32.2	2.2	7.3	37.0	2	5.7	42.3	2.3	5.7
4	6	27.7	2.7	10.8	32.9	2.9	9.7	36.1	1.1	3.1	41.1	1.1	2.8
8	6	28.5	3.5	14.0	31.4	1.4	4.7	36.5	1.5	4.3	41.8	1.8	4.5
8	6	27.7	2.7	10.8	32.9	2.9	9.7	36.7	1.7	4.9	41.3	1.3	3.2

表 3 (续)

参数		黑体25 ℃			黑体30 ℃			黑体35 ℃			黑体40 ℃		
<i>L</i>	<i>G</i>	辐射 温度/℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%	辐射 温度/℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%	辐射 温度/℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%	辐射 温度/℃	绝对 误差/℃	相对 误差/%
16	6	28.1	3.1	12.4	33.4	3.4	11.3	37.7	2.7	7.7	41.5	1.5	3.8
16	6	27.9	2.9	11.6	32.9	2.9	9.7	38.2	3.2	9.1	41.9	1.9	4.8
32	6	27.4	2.4	9.6	32.4	2.4	8.0	37.0	2	5.7	42.3	2.3	5.7
32	6	27.9	2.9	11.6	31.9	1.9	6.3	37.8	2.8	8.0	42.2	2.2	5.5

通过热像仪不同参数下灰度温度模型反演的物体辐射温度比黑体靶标实际的辐射温度略高, 辐射温度的绝对误差在 4 ℃ 以内, 相对误差在 14% 以下, 造成误差较大的原因主要有这几方面: 一是目标实际发射率高于设定值, 反演温度必然偏高, 同时材料发射率随波长变化, 而热像仪通常采用波段平均发射率; 二是背景环境的辐射反射造成的误差, 试验室中为了简便, 忽略了背景环境影响; 三是标定数据与圆形靶标验证数据是不同时间测试的, 与试验室的环境温度、湿度、调试设备时人为因素等方面相关。

4) 水面舰艇的目标光学特性

水面舰艇的灰度图如图 9 所示, 对应辐射温度的伪彩色图如图 10 所示。水面舰艇距离热像仪大约 6 km, 能见度为 20 km, 大气透过率和路径辐射分为 3 段计算, 每段 2 km, 利用 Modtran 软件计算大气透过率及路径辐射, 结果如表 4 所示。



图 9 目标灰度图
Fig. 9 Gray image of target

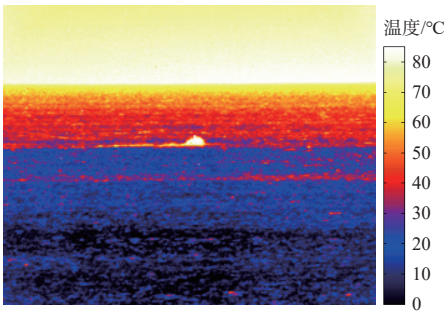


图 10 目标辐射温度伪彩图
Fig. 10 Pseudo color image of target radiation temperature

表 4 能见度 20 km 的海平面大气透过率及路径辐射
Table 4 Sea level atmospheric transmittance and path radiation with a visibility of 20 kilometers

$\lambda/\mu\text{m}$	τ_1	τ_2	τ_3	τ	$L_{\text{path}}/(\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$
8.0	0.975	0.973	0.970	0.920	0.28
10.0	0.988	0.985	0.983	0.957	0.24
12.0	0.976	0.985	0.984	0.946	0.25

考虑到一定的海面环境影响, 对目标的红外辐射进行相应修正, 与实际的测温热像仪相比, 差值在 15 ℃ 左右, 计算的目标红外辐射特性如表 5 所示。

表 5 固定条件下目标的红外辐射特性
Table 5 Infrared radiation characteristics of targets under fixed conditions

<i>T</i> /℃	<i>L</i> /(<i>W</i> · <i>sr</i> ⁻¹ · <i>m</i> ⁻²)	<i>S</i> /m ²	<i>I</i> /(<i>W</i> · <i>sr</i> ⁻¹)
19.917	22.024 7	1.765 42	38.882 8

3 结论

该目标红外辐射特性测量方法简单易操作, 通过设定增益、偏置参数, 采集黑体靶标不同温度的灰度图像, 建立热像仪灰度与温度模型; 运用模型反演不同灰度目标的辐射温度, 并对其进行伪彩色显示。获取目标辐射温度的同时, 可通过相应计算得到目标辐射亮度、辐射强度等信息。通过热像仪室内试验数据发现, 在一定的增益偏置条件下, 反演目标辐射温度的绝对误差在 4 ℃ 以内, 相对误差在 14% 以下。外场试验数据反演目标辐射温度误差较大, 主要来源于大气传输时透过率波动、路径辐射干扰、材料表面状态变化导致的发射率波动, 以及反演算法的缺陷等。在热像仪的灰度-温度模型中, 线性区的标定无法直接应用于非线性区(如高增益区或近饱和区), 需单独建立非线性补偿模型, 确保全量程温度测量的有效性和准确性。对非线性区后续会独立标定增益和偏置, 建立非线性区相应模型, 在线性区与非线性区

交接处采用线性插值做平滑处理。后期将通过增加模型系数、建立非线性区补偿模型等方式来进一步完善热像仪标定的灰度与温度模型。

参考文献:

- [1] 成声月, 刘朝辉, 邓智平, 等. 军用目标红外辐射特征研究进展[J]. *红外技术*, 2014, 36(7): 577-581.
CHENG Shengyue, LIU Zhaohui, DENG Zhiping, et al. Research progress on infrared characteristic of military target[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 577-581.
- [2] 马小莉. 典型海面红外辐射特性及场景仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
MA Xiaoli. Research on infrared radiation characteristics and scene simulation of typical sea surface[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [3] 王明波, 刘颖. 复杂环境下的红外目标特性测量方法研究[J]. *红外*, 2013, 34(6): 29-33.
WANG Mingbo, LIU Ying. Research on measurement method of infrared target characteristics in complex environment[J]. *Infrared*, 2013, 34(6): 29-33.
- [4] 曹西征, 郭立红. 基于图像的飞行器红外辐射特性测量[J]. *光学技术*, 2007, 33(2): 299-304.
CAO Xizheng, GUO Lihong. Measurement of the infrared radiation characteristic of the aerobal based on images[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(2): 299-304.
- [5] 何瑛, 林晓焕. 目标红外辐射特性测量与数据分析[J]. *电子测试*, 2014(11): 45-48.
HE Ying, LIN Xiaohuan. Measurement and data analysis of infrared radiation characteristic of target[J]. *Electronic Test*, 2014(11): 45-48.
- [6] 王学伟, 王世立, 李珂. 舰船目标红外图像特性研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(5): 837-840.
WANG Xuwei, WANG Shili, LI Ke. Characteristic of ship target IR image[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(5): 837-840.
- [7] 陈超帅, 王世勇. 大疆无人机目标红外辐射特性测量及温度反演[J]. *光电工程*, 2017, 44(4): 427-434.
CHEN Chaoshuai, WANG Shiyong. Infrared radiation characteristics measurement and temperature retrieval based on DJI unmanned aerial vehicle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(4): 427-434.
- [8] 张卫国, 张则剑, 贾娜. 海上目标红外辐射特性测量数据处理系统设计[J]. *激光与红外*, 2018, 48(7): 860-866.
ZHANG Weiguo, ZHANG Zejian, JIA Na. Design of data processing system for sea-target infrared radiation characteristic measurement[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(7): 860-866.
- [9] 王学新, 杨鸿儒, 俞兵, 等. 红外目标等立体角标定和测量方法研究[J]. *应用光学*, 2018, 39(4): 518-521.
WANG Xuexin, YANG Hongru, YU Bing, et al. Calibration and measurement method for IR target under the same solid angle[J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(4): 518-521.
- [10] 禄晓飞, 盛捷, 赵慧. 红外辐射测量系统外场标定方法及飞行目标亮度反演方法[J]. *红外技术*, 2015, 37(2): 154-160.
LU Xiaofei, SHENG Jie, ZHAO Hui. Outdoor calibration system of infrared device and method of computing luminance of aircraft[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(2): 154-160.
- [11] 李桂芝, 孙健, 吕瑶. 海天背景典型舰船目标红外特性测量方法研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(5): 44-47.
LI Guizhi, SUN Jian, LYU Yao. The infrared characteristic measurement method of vessel target under the sea-sky background[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 38(5): 44-47.
- [12] 李超, 张玉国, 刘保伟, 等. 目标辐射特性现场校准用大面积黑体辐射源技术研究[J]. *应用光学*, 2021, 42(2): 292-298.
LI Chao, ZHANG Yuguo, LIU Baowei, et al. Research on technology of large area blackbody radiation source used in field calibration for target radiation characteristics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(2): 292-298.
- [13] 王华伟. 基于红外热成像的温度场测量关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
WANG Huawei. Research on the key technologies of temperature field measurement based on thermal infrared imager[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [14] 袁林光, 范纪红, 周晓光, 等. 近紫外到近红外光谱辐射计及定标方法研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(3): 478-482.
YUAN Linguang, FAN Jihong, ZHOU Xiaoguang, et al. Research on near-UV to near-IR spectroradiometer and its calibration method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 478-482.
- [15] 沙江, 刘玉峰, 童一峻, 等. 舰船红外目标特性测试流程和辐射强度计算方法[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(增刊): 319-321.
SHA Jiang, LIU Yufeng, TONG Yijun, et al. Study of data measurement step and radiation computing of navy ship infrared signal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(S): 319-321.