

文章编号: 1672-8785(2022)05-0021-07

基于红外相机积分时间的辐射特性测量精度分析

郭 鑫¹ 张 涛^{1*} 谷 健² 李 周¹ 赵新宇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. 中国人民解放军 63768 部队, 陕西 西安 713800)

摘 要: 在进行辐射特性测量时, 红外相机积分时间的选取是影响特性测量精度的重要因素。针对该问题, 以辐射特性测量实验数据为基础, 对同一温度、不同积分时间下的红外图像对比度、信噪比以及辐射特性测量精度进行了分析。结果表明, 积分时间通过影响红外图像的对比度和信噪比进而影响了辐射特性测量精度。适当延长红外相机的积分时间, 可以增强图像的对比度和信噪比, 从而提高辐射特性测量精度。该结果对红外辐射特性测量系统相机积分时间的选取具有指导意义。

关键词: 辐射特性测量; 积分时间; 红外焦平面阵列; 辐射定标; 红外图像

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.05.004

Accuracy Analysis of Radiation Characteristic Measurement Based on Integral Time of Infrared Camera

GUO Xin¹, ZHANG Tao^{1*}, GU Jian², LI Zhou¹, ZHAO Xin-yu¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. 63768 Unit of PLA, Xi'an 713800, China)

Abstract: In the measurement of radiation characteristics, the selection of integration time of infrared camera is an important factor affecting the accuracy of characteristic measurement. To solve this problem, the infrared image contrast, image signal-to-noise ratio and radiation characteristics measurement accuracy under the same temperature and different integration time are analyzed in this paper based on the experimental data of radiation characteristics measurement. The analysis results show that the integration time affects the measurement accuracy of radiation characteristics by affecting the contrast and signal-to-noise ratio of infrared image. Appropriately improving the integration time of infrared camera can enhance the contrast and signal-to-noise ratio of image, so as to improve the measurement accuracy of radiation characteristics. The results have guiding significance for the selection of camera integration time of infrared radiation characteristic measurement system.

Key words: radiation characteristic measurement; integration time; infrared focal plane array; radiometric calibration; infrared image

收稿日期: 2022-05-03

作者简介: 郭鑫(1996-), 女, 吉林通化人, 硕士, 主要从事数据处理与测量技术研究。

E-mail: 1475941274@qq.com

0 引言

随着军事的发展,红外预警、反导和各类武器装备红外隐身技术的研究变得至关重要。红外辐射特性是评价军事目标红外隐身效果的关键依据,也是红外预警、反导的重要基础数据。因此,地基、空基、天基的各类红外特性测量系统是目前各种军事装备的重要观测设备^[1-2]。

目前常用的红外辐射特性测量方法通过红外成像系统采集观测目标的红外图像,并利用图像灰度信息进行目标辐射特性的反演。因此,红外成像系统探测器的优劣以及探测器参数的选择是影响红外辐射特性测量精度的首要因素。而积分时间是红外成像系统探测器的重要参数。通过控制红外焦平面成像系统探测器像元积累辐射信号产生电荷的时间,使得系统的输出电压、响应率、噪声和比探测率等性能参数均受影响,进而提高成像质量^[3-4]。因此,选择合适的积分时间对保证成像质量、提高红外辐射特性测量精度有重大意义。

为了分析积分时间影响辐射特性精度的原因,本文利用中波红外相机和面源黑体进行了辐射特性测量实验。首先完成了红外相机辐射定标和大气传输修正参数测量实验,然后在不同黑体温度点下采集了每一温度点不同积分时间下的目标红外图像,最后通过实验数据分析了积分时间与辐射特性测量精度的关系。而图像对比度和信噪比是衡量成像质量的重要参数,所以进一步对不同积分时间下的图像对比度和信噪比进行分析,得出积分时间通过影响图像对比度和信噪比来影响特性测量精度的结论,说明了积分时间的选取对辐射特性测量的重要性。

1 实验原理

1.1 辐射定标

辐射定标的基本原理是将黑体对准红外成像系统,通过调整黑体温度使其输出不同的辐射能量,以获取黑体辐射亮度与该红外成像系

统输出之间的响应关系^[5]。本文采用考虑积分时间的辐射定标法对红外成像系统进行定标。下面介绍相关原理。

对于线性响应的红外成像系统来说,当前积分时间下黑体辐射亮度与系统输出灰度值之间的关系为

$$h_{i,j} = G_{i,j} \cdot L(T_t) + B_{i,j} \quad (1)$$

式中, $h_{i,j}$ 为红外探测器焦平面阵列像元 (i,j) 的响应灰度值; $G_{i,j}$ 为响应率; $B_{i,j}$ 为由红外成像系统杂散辐射和暗电流等因素引起的偏置。

在考虑积分时间的辐射定标中,偏置 $B_{i,j}$ 是积分时间 t 的线性函数,辐射定标方程为

$$h_{i,j} = t \cdot G_{i,j} L(T_t) + t \cdot h_{out,i,j} + h_{in,i,j} \quad (2)$$

式中, $t \cdot h_{out,i,j}$ 为成像系统杂散辐射引起的偏置; $h_{in,i,j}$ 为暗电流等自身因素引起的系统输出^[6]。

1.2 大气传输修正

一切有温度的物体都会向外辐射能量。红外辐射特性测量的核心思想就是通过接收被测目标辐射的能量来计算其辐射特性。但在实际测量中,由于大气衰减、大气散射以及大气自身红外辐射等因素的影响,系统接收到的辐射能并不是目标辐射能的真实值。因此,必须进行大气传输修正以减小大气对特性测量结果精度的影响^[7]。

大气传输修正主要利用激光雷达、自动气象站等设备,并结合大气传输修正参数计算软件来计算辐射特性测量系统所处环境的大气透过率、程辐射和环境辐射等参数。通过用这些参数对测量结果进行修正,可降低大气对结果精度的影响。国际上流行的大气传输修正参数计算软件主要是美国的 LOWTRAN 和 MODTRAN 等。但这些软件是根据美国的地理及大气条件建立的,并不能很好地符合我国情况。于是中国科学院安徽光学精密机械研究所根据国内实际的环境气象条件,研制了一种可很好地提高大气传输修正精度的 CART 大气传输修正参数计算软件^[8]。

1.3 辐射特性测量原理

图 1 为辐射特性测量原理图。在进行辐射特性测量时, 进入红外辐射特性测量系统的能量主要包括经大气衰减后的被测目标自身的辐射能 $\epsilon_t \tau_{atm} L(T_t)$ 、经大气衰减后目标对周围环境反射的辐射能 $(1 - \epsilon_t) \tau_{atm} L(T_b)$ 以及大气程辐射 L_{path} 三部分。其中, ϵ_t 为目标发射率, τ_{atm} 为大气透过率, T_t 为目标被观测表面的温度, T_b 为目标周围背景环境的温度^[8]。

红外测量系统的数字灰度输出值为

$$DN = \epsilon_t \tau_{atm} GL(T_t) + (1 - \epsilon_t) \tau_{atm} GL(T_b) + GL_{path} + B \quad (3)$$

式中, G 和 B 分别为通过辐射定标获得的目标辐射亮度响应和偏置。由式(3)可得到目标的辐射亮度:

$$L(T_t) = \frac{DN - B - (1 - \epsilon_t) \tau_{atm} GL(T_b) - GL_{path}}{\epsilon_t \tau_{atm} G} \quad (4)$$

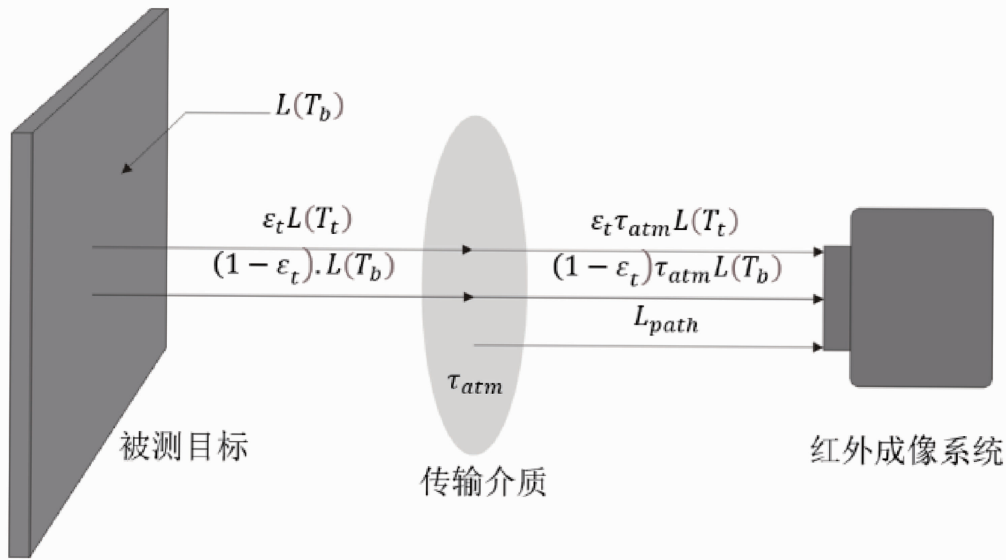


图 1 辐射特性测量原理图

表 1 中波红外相机和面源黑体的主要参数指标

中波红外相机		面源黑体	
参数	指标	参数	指标
响应波段	3.7~4.8 μm	辐射面口径	230.1 mm×228.3 mm
相对口径	f/4	温度范围	0~150℃
像元尺寸	15 μm×15 μm	温度精度	±0.5℃
探测器像元数	640 (H)×512 (V)	温度分辨率	0.01℃
输出位数	14 位	发射率	96%

式中, G 和 B 两个参量可以由辐射定标得到; 目标发射率 ϵ_t 可通过实际测量得到; 环境辐射能 $L(T_b)$ 、大气透过率 τ_{atm} 、程辐射 L_{path} 均可通过 MODTRAN 等大气传输模型计算软件得到。参数全部获取完毕后, 即可根据式(4)计算出目标辐射亮度^[8]。

2 实验

为了更好地分析积分时间影响红外辐射特性测量系统测量精度的原因, 利用中波红外相机和面源黑体搭建了实验硬件平台。中波红外相机与其他光学结构、电路和计算机共同构成一个焦距为 800 m 的红外成像系统。面源黑体被用作辐射定标黑体和辐射特性测量的目标。表 1 列出了中波红外相机和面源黑体的主要参数指标。

2.1 辐射定标

在开始进行目标辐射特性测量之前,首先利用面源黑体对中波红外相机进行辐射定标。在5 ms、6 ms、7 ms、8 ms、9 ms五档积分时间下进行定标。其中每档积分时间下取30℃、40℃、50℃、60℃四个温度点进行测量。最终得到各积分时间下的定标增益 k 和定标偏置 b (见表2)。由此可得红外成像系统输出灰度与辐射亮度的关系曲线(见图2)。

表2 各积分档位的标定参数

积分时间/ms	定标增益 k	定标偏置 b
5	1504.55	1243.56
6	1833.03	1289.94
7	2162.61	1341.36
8	2492.38	1389.25
9	2987.63	1461.64

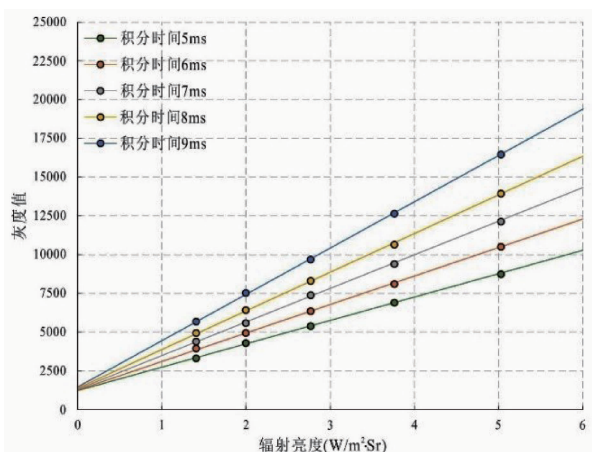


图2 系统输出灰度与辐射亮度的关系曲线

2.2 大气传输修正参数采集

大气传输修正参数包括大气透过率、程辐射和环境辐射。本文利用激光雷达、太阳辐射计、能见度仪和自动气象站来采集大气数据,然后通过CART大气传输模型计算软件计算出目标与测量系统所处环境的透过率、程辐射和环境辐射。表3列出了部分测量结果。

2.3 目标辐射特性测量

目标辐射特性测量实验将黑体作为测试目标。将黑体与红外成像系统拉开1.5 km的距离,同时利用升降台等辅助工具使得目标在红外成像系统中完整成像。实验台搭建完毕后,

开始对黑体进行升温。为了更好地分析积分时间对红外辐射特性测量精度影响的原因,将黑体分别升温至30℃、40℃、50℃、60℃,并在每个温度点采集5 ms、6 ms、7 ms、8 ms、9 ms五个积分时间下的目标红外图像。观察在以上实验条件下采集到的红外图像,目标均清晰成像。采集到的部分图像如图3所示,目标处在图中蓝色矩形框区域内。

3 实验结果分析

3.1 精度分析

由普朗克公式可以计算出30℃、40℃、50℃和60℃下目标辐射亮度的理论值分别为1.41061 W/m²·Sr、1.996491 W/m²·Sr、2.767123 W/m²·Sr和3.762637 W/m²·Sr。结合测量的定标数据和大气传输修正参数,对采集到的红外图像进行目标辐射特性计算,并计算其相对误差(取绝对值)。表4列出了目标辐射特性结果及精度。

图4所示为根据表4得到的各温度点下辐射特性测量精度随积分时间的变化曲线。

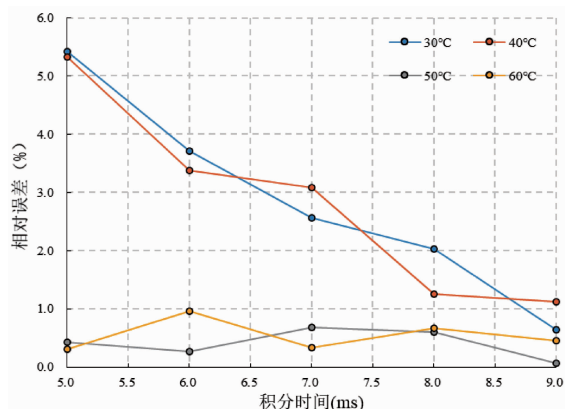


图4 辐射特性测量精度随积分时间的变化曲线

分析数据后不难看出,当温度为30℃和40℃时,随着积分时间的增加,辐射特性测量结果的相对误差明显减小。也就是说,积分时间确实会影响特性测量精度。当温度为50℃和60℃时,随着积分时间的增加,测量结果的相对误差不再发生规律性变化,但整体上均比30℃和40℃时低,并维持在1%以内。后续将分析该现象的产生原因。

表 3 大气传输修正参数

时间/ms	透过率	程辐射/(W/m ² ·Sr)	环境辐射/(W/m ² ·Sr)
54438650	0.462	0.192	0.465
54438660	0.462	0.192	0.465
54438670	0.462	0.192	0.465
54438680	0.462	0.192	0.465
54438690	0.462	0.192	0.465
54438700	0.462	0.192	0.465
54438710	0.462	0.192	0.465
54438720	0.462	0.192	0.465
54438730	0.462	0.192	0.465
54438740	0.462	0.192	0.465

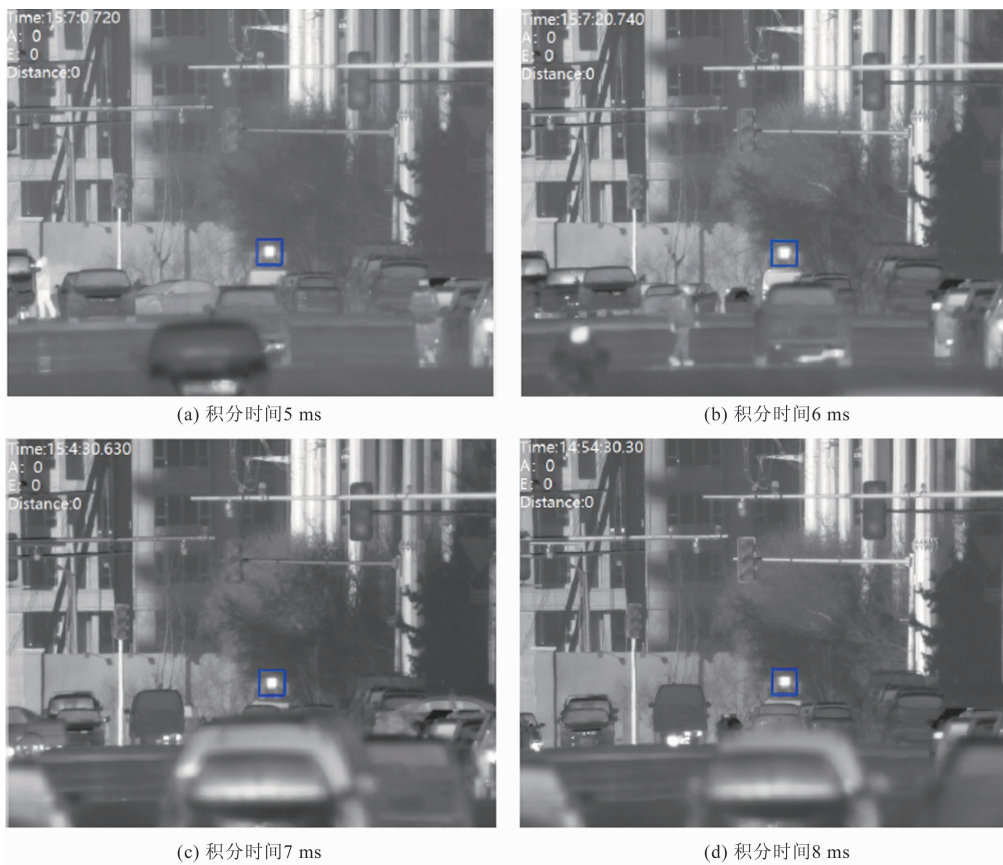


图 3 各积分时间下的目标红外图像(60℃时采集)

表 4 目标辐射特性结果及精度

积分 时间/ms	30		40		50		60	
	辐射亮度/ (W/m ² ·Sr)	相对 误差/%	辐射亮度/ (W/m ² ·Sr)	相对 误差/%	辐射亮度/ (W/m ² ·Sr)	相对 误差/%	辐射亮度/ (W/m ² ·Sr)	相对 误差/%
5	1.334	5.415	1.890	5.330	2.755	0.432	3.751	0.312
6	1.358	3.707	1.929	3.376	2.774	0.263	3.799	0.965
7	1.374	2.568	1.935	3.089	2.786	0.678	3.750	0.330
8	1.382	2.035	1.971	1.253	2.751	0.595	3.788	0.674
9	1.402	0.639	1.974	1.128	2.765	0.073	3.780	0.460

表5 图像对比度和信噪比计算结果

温度/°C	30		40		50		60	
积分时间/ms	对比度	信噪比	对比度	信噪比	对比度	信噪比	对比度	信噪比
5	0.371	478.457	0.646	496.98	1.020	475.040	1.383	490.392
6	0.403	530.967	0.713	536.799	1.102	576.328	1.551	545.309
7	0.433	590.023	0.798	560.760	1.174	595.601	1.619	580.218
8	0.455	623.635	0.810	587.628	1.219	652.928	1.667	637.108
9	0.489	649.987	0.873	658.214	1.342	694.270	1.887	648.831

3.2 积分时间影响辐射特性测量精度的原因分析

影响目标辐射特性测量精度的最直接原因就是成像质量。图像对比度和信噪比是判断成像质量的两个重要参数：对比度越高，图像中目标和背景越容易区分，目标识别越准确；信噪比越高，信号受噪声干扰越少，图像中目标的灰度值越接近真实值。因此，为了找出积分时间影响辐射特性测量精度的原因，需要分析积分时间是否对图像对比度和信噪比有影响。

本文对各个温度点下5档积分时间的红外图像进行了对比度和信噪比计算(结果见表5)。

图5和图6所示分别为根据表5绘制的对比度-积分时间和信噪比-积分时间关系曲线。

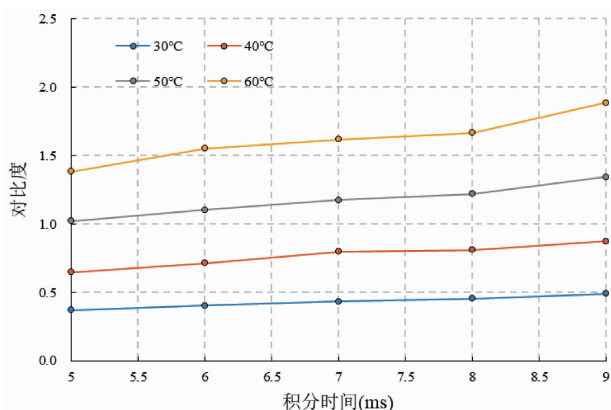


图5 对比度-积分时间关系曲线

由以上数据可知，积分时间确实会影响红外图像的对比度和信噪比。积分时间越长，红外图像的对比度和信噪比越高，成像质量越好。所以推断出积分时间可以通过影响图像的对比度和信噪比来影响红外特性测量精度。

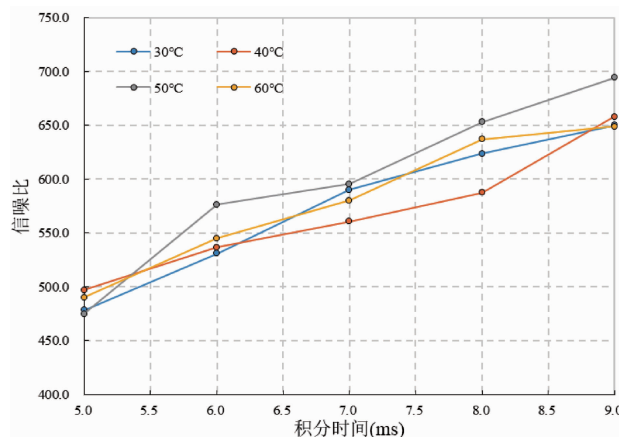


图6 信噪比-积分时间关系曲线

结合前面的精度分析可知，当温度为30°C和40°C时，积分时间的改变引起了成像质量的变化，进而影响了辐射特性测量精度。当温度为50°C和60°C时，积分时间的改变虽然依旧引起了像质的变化，但对测量结果精度影响不大。

为了分析产生这种现象的原因，计算了各温度点各积分时间下的目标平均灰度(结果见表6)。

观察表中数据可以发现，在同一积分时间下，温度越高，目标平均灰度越大。也就是说，目标信号越强，抵抗噪声干扰的能力就越强。

因此，当温度为30°C和40°C时，目标信号较弱，易受噪声影响。而积分时间的增加则提高了图像的对比度和信噪比，削弱了噪声的影响，从而提高了特性测量精度。当温度为50°C和60°C时，目标信号已经足够强，噪声对结果精度影响较小。所以各积分时间下的特

表 6 各温度点 5 档积分时间下的目标平均灰度

黑体温度/°C		30	40	50	60
目标	积分时间 1 (5 ms)	2454	2842	3467	4162
	积分时间 2 (6 ms)	2802	3292	3983	4880
区域	积分时间 3 (7 ms)	3127	3696	4545	5527
	积分时间 4 (8 ms)	3477	3907	5005	6149
平均	积分时间 5 (9 ms)	3983	4755	5871	7308

性测量结果误差均很小, 且积分时间的改变虽然引起了图像信噪比和对比度的变化, 但对精度影响不大。

此外, 结合 40°C 时 8 ms、9 ms 积分时间下的目标区域平均灰度值和辐射特性测量结果相对误差后不难看出, 当积分时间增加到目标信号已经足够强时, 测量精度已经很好, 再增加积分时间对结果精度影响不大。

4 结束语

红外相机的积分时间会对红外辐射特性测量精度产生影响, 而影响辐射特性测量结果的最直接因素是红外图像成像质量。因此, 本文从衡量成像质量的两个指标——对比度和信噪比两方面分析了红外相机积分时间影响红外辐射特性测量精度的原因。通过实验数据分析可知, 积分时间的改变会造成红外图像对比度和信噪比的变化, 从而影响红外特性测量结果的精度。在目标辐射能量较弱时, 增加相机积分时间会大大提高特性测量精度。但在积分时间将目标信号提高到足够强或者目标本身辐射能量足够强的情况下, 计算精度已经很高, 改变积分时间对结果影响不大。本文的工作对红外辐射特性测量系统相机积分时间的选取具有指导意义。后续会将如何根据图像质量快速、精确调整相机积分时间作为工作重点, 并对其进

行深入研究。

参考文献

- [1] 王智平, 吴统邦, 李周, 等. 一种通用的红外辐射特性测量技术 [J]. 红外, 2020, 41(8): 29-35.
- [2] 陈川, 易维宁, 崔文煜. 基于参考源的空间目标红外辐射特性测量 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 196-203.
- [3] 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, 39(5): 727-730.
- [4] 李满良, 吴钦章, 夏默, 等. 基于辐射标定的积分时间实时调整方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2014, 33(3): 297-302.
- [5] 李周, 乔彦峰, 常松涛, 等. 宽动态范围红外辐射测量系统快速定标算法 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 158-166.
- [6] 姚源, 刘齐悦. 大口径中波红外辐射特性测量系统标定 [J]. 电子设计工程, 2022, 30(2): 115-119.
- [7] 李保霖, 蔡立华, 张涛, 等. 基于长波红外成像系统的红外辐射特性测量方法 [J]. 红外, 2018, 39(6): 15-20.
- [8] 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: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.