

文章编号: 1672-8785(2020)08-29-07

一种通用的红外辐射特性 测量技术

王智平¹ 吴统邦² 李周^{3*} 李春娜⁴

(1. 中国人民解放军 91245 部队, 辽宁 葫芦岛 125000;

2. 中国人民解放军 95859 部队, 甘肃 酒泉 735018;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院天基动态快速
光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

4. 中国人民解放军 964 医院 461 院区, 吉林 长春 130062)

摘 要: 目标的红外辐射特性是实现目标隐身性能评估与目标识别的重要红外数据之一。传统的红外辐射反演技术会将目标分为点目标和面目标来分别加以处理。考虑到靶场目标的飞行姿态和距离变化的影响, 利用现有的红外辐射特性数据难以明确地将点目标与面目标分开处理。就此提出了一种通用的红外辐射特性测量方法。该方法可统一实现目标特性的处理, 并简化了数据处理的模式。采用口径为 600 mm 的中波红外辐射特性测量系统对目标反演精度进行了验证。在积分时间为 2000 μs 和 3000 μs 的条件下分别对目标进行了数据处理, 证实了本文方法的有效性。结果表明, 该方法具有一定的工程应用意义。

关键词: 红外成像; 辐射测量; 辐射定标; 红外探测器

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.08.005

A General Technology of Infrared Radiation Characteristics Measurement

WANG Zhi-ping¹, WU Tong-bang², LI Zhou^{3*}, LI Chun-na⁴

(1. 91245 Army Unit of PLA, Huludao 125000, China;

2. 95859 Army Unit of PLA, Jiuquan 735018, China;

3. Key Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Changchun Institute
of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

4. The 461 district of 964 Hospital, Joint Service Support Force of PLA, Changchun 130062, China)

Abstract: The infrared radiation characteristic of the target is one of the important infrared data for stealth performance evaluation and target recognition. The traditional infrared radiation inversion technology categorizes

收稿日期: 2020-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675506)

作者简介: 王智平(1977-), 男, 陕西蒲城人, 工程师, 主要研究方向为测控技术、光学装备应用及装备管控技术。

*通讯作者: E-mail: 15500027661@163.com

the targets into point targets and surface targets for processing respectively. Considering the influence of the flight attitude and range variation of the target, it is difficult to categorize the targets into point targets and surface targets by using the present infrared radiation characteristic data. A general method for measuring infrared radiation characteristics is proposed in this paper, which can unify the processing of target characteristics and simplify the data processing mode. In this paper, the accuracy of target inversion is verified by using this method based on the measuring system of medium wave infrared radiation characteristics of 600 mm caliber. The target data is processed respectively under the conditions of 2000 μs and 3000 μs integration time, which proves the effectiveness of the proposed algorithm. This method has certain engineering application significance.

Key words: infrared imaging; radiation measurement; radiation calibration; infrared detector

0 引言

红外辐射特性测量技术是获得飞行目标真实辐射特性最直接的测量手段,具有重要的军事应用价值。经反演得到的目标红外辐射特性数据可以作为评价导弹红外隐身效果的依据,也可以作为基础数据用于红外预警、反导以及各类武器装备的红外隐身技术研究。在装备领域,现有的地基、空基和天基红外辐射特性测量系统是各种军事装备研制和发射过程中的重要观测设备^[1-2]。

世界上的各个军事大国对目标红外辐射特性测量技术都非常重视。其中,美国对该技术的研究最早,积累的数据也最多。早在 20 世纪 60 年代,他们就已经着手开展飞机红外辐射特性测量技术研究,并将其用于反飞机红外制导导弹的研制^[3]。20 世纪 70 年代到 90 年代,美国开展了洲际导弹再入段和中段的隐身技术研究,并采用红外辐射特性测量技术实施了再入段地基测量计划(GLOW)、中段机载测量计划(MATS)和球载高空镶嵌计划(BAMM)等。在项目研究过程中,他们逐步建立起了各类目标、背景以及不同气象条件下的大气辐射理论模型^[4]。总结起来,国外在军事目标辐射测量技术方面的研究重点是多波段与复杂作战环境下的目标识别和光学辐射特性测量。欧美各国逐步利用地基、空基和天基技术手段建立了复杂的辐射特性测量体系^[5]。

在光电探测设备建设方面,美国的毛伊岛观测站是地基光学辐射特性测量设备的代表

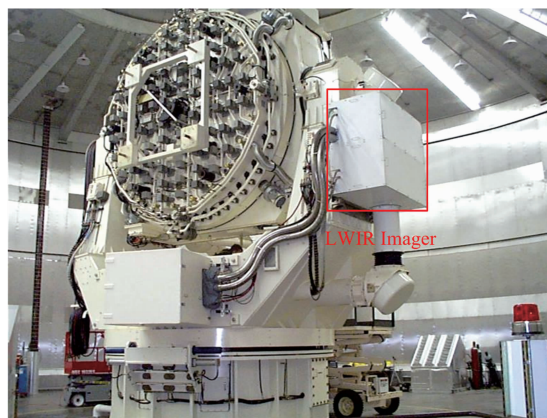


图 1 毛伊岛观测站的 3.67 m 长波红外成像仪

(见图 1)。它将不同波段的多台观测设备相结合,构成了综合性的光电探测系统。该系统可对不同轨道高度的目标进行观测。图 2 所示为它对哈勃空间望远镜的观测效果。此光学系统能够在雷达观测数据的引导下对弹道中段导弹、大气层内的飞行器和航天火箭等不同轨道高度的各类目标进行实时跟踪观测和高精度红外辐射特性测量。另外,该系统还能够观测高度在 4800 km 以下的人造卫星和输出目标红外图像,并可测量其表面反射与自身红外辐射特性^[6-7]。可以看出,红外辐射特性测量数据具有重要的军事应用价值。

本文针对靶场目标红外辐射特性测量技术,介绍了红外辐射定标的基本原理,然后根据外场环境的辐射测量需求提出了一种通用的红外辐射特性测量方法,并对目标辐射特性测量数据进行了统一处理,从而简化了数据处理模式。最后对数据处理结果进行了验证。试验结果表明,在保证辐射测量精度的情况下,该

方法切实有效并具有一定的工程应用价值。

1 红外辐射定标的基本原理

红外辐射定标是实现红外辐射测量的基础和前提。辐射定标的目的是建立辐射量与探测器输出灰度值之间的定量数值联系, 并获得红外系统接收到的辐射能量与成像电子学组件输出量之间的定量关系, 进而反演出目标的辐射亮度、辐射强度和辐射温度等辐射量数据^[8-9]。

对于地基红外辐射测量系统来说, 最基本的定标方法是外置扩展源定标法(见图 3)。该方法将一个已知辐射量的均匀辐射源放在系统的入瞳前, 使其充满系统的整个视场。通过调节入射辐射并得到输出的灰度图像, 便可计算系统的定标响应参数, 从而完成定标。黑体是一种最常用的均匀辐射源。根据普朗克辐射定

律可知, 通过设定黑体温度可以准确地计算出黑体的入射辐射量, 因此可将其作为定标源。

设光学系统的焦距为 f , 入瞳直径为 D , 则焦平面像元 (i, j) 接收到黑体的能量即为与入瞳大小相等的黑体辐射面在平行于该像元中心相应主光线的辐射方向上(辐射立体角等于该像元相应立体角下)的辐射通量。若主光线与光轴的夹角为 θ , 则其对应的立体角为^[10-11]

$$\begin{aligned}\Omega &= \frac{A \cdot \cos\theta}{(f/\cos\theta)^2} \\ &= \frac{A \cdot \cos^3\theta}{f^2}\end{aligned}\quad (1)$$

每个像元所接收的辐射通量可以表示为

$$\begin{aligned}\phi(T) &= \tau_{opt} \cdot A \cdot \cos\theta \cdot \Omega \cdot L(T_b) \\ &= \frac{\tau_{opt} \cdot A \cdot \cos^4\theta}{f^2} \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L(T_b)\end{aligned}$$

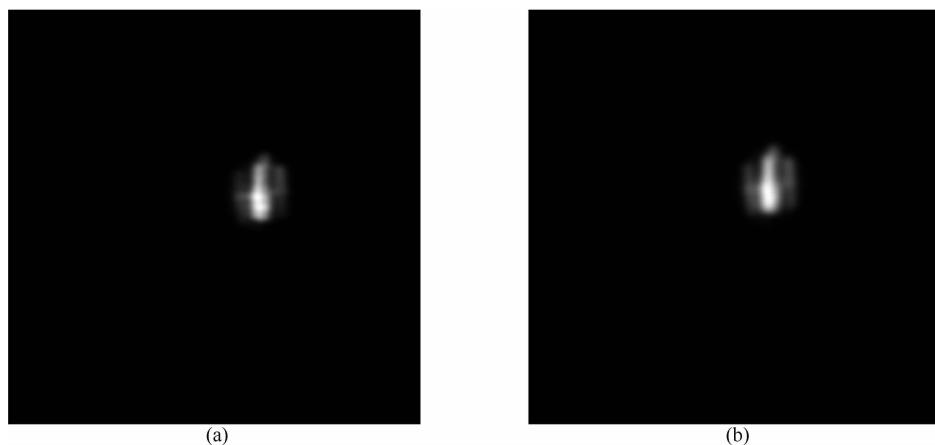


图 2 长波红外成像仪对哈勃空间望远镜的成像效果: (a)探测波段为 8.35~9.13 μm ; (b)探测波段为 11.1~12.2 μm

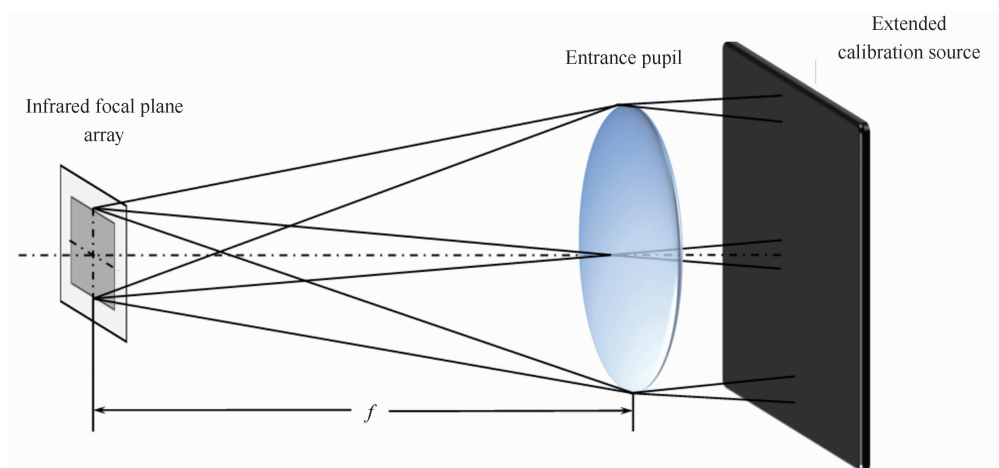


图 3 外置扩展源定标法的示意图

$$= k \cdot L(T_b) \quad (2)$$

式中, τ_{opt} 为红外光学系统的透过率, T_b 为辐射定标黑体的温度, $L(T_b)$ 为定标源的辐射亮度。地基红外辐射测量系统的视场角一般较小, 即 $\cos^4\theta$ 可以近似为 1。因此, $k = \frac{\tau_{opt} \cdot A \cdot \cos^4\theta \cdot \pi \cdot D^2}{4f^2}$ 是一个与标准辐射定标源温度无关的量, 即

$$L(T_b) = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T_b) d\lambda \quad (3)$$

式中, $E(\lambda, T_b)$ 为系统接收的定标源的辐射照度。对于线性响应的红外系统来说, 像元的输出灰度值与到达该像元的辐射通量成正比。由式(2)可知, 辐射通量与目标的辐射亮度成正比。因此, 当前积分时间下黑体辐射亮度与系统输出灰度值(单位为 DN)的关系为

$$G_{ij} = R_{ij} \cdot L(T_b) + B_{ij} \quad (4)$$

式中, G_{ij} 为红外焦平面探测器像元(i, j)的响应值, R_{ij} 为该像元对红外辐射亮度的响应率, B_{ij} 为由红外探测系统的杂散辐射和暗电流等因素引起的偏置(单位为 DN)。

2 通用的红外辐射特性测量技术

从上述定标原理出发, 提出一种通用的辐射特性测量技术。假设目标的有效面积为 A , 目标与探测器之间的距离为 d , 探测器单个像元的视场为 ω , 目标对探测器单个像元的实际有效探测面积为 a , 则目标对探测器单个像元的实际有效视场为

$$\Omega = \frac{a}{d^2} \quad (5)$$

在单个像元上接收到的目标与背景的辐射照度为

$$E(T) = [L_0(T) \cdot \Omega + L_b(\omega - \Omega)] \cdot \bar{\tau}_{atm} + L_{path} \cdot \omega \quad (6)$$

式中, $L_0(T)$ 为目标在探测器波段响应内的平均辐射亮度, L_b 为背景片的平均辐射亮度, L_{path} 为路径辐射亮度, $\bar{\tau}_{atm}$ 为大气平均透过率。

经过光学系统聚焦到红外焦平面时, 光敏面上的光谱辐射功率为

$$P(T) = E(T) \cdot A_0 \cdot \bar{\tau}_{opt}$$

$$= \{[L_0(T) \cdot \Omega + L_b(\omega - \Omega)] \cdot \tau_{atm} + L_{path} \cdot \omega\} \cdot A_0 \cdot \bar{\tau}_{opt} \quad (7)$$

式中, A_0 为光学系统的有效通光面积, $\bar{\tau}_{opt}$ 为光学系统的透过率。

探测器相应像元产生的电压为

$$V = P(T) \cdot R$$

$$= \{[L_0(T) \cdot \Omega + L_b(\omega - \Omega)] \cdot \tau_{atm} + L_{path} \cdot \omega\} \cdot A_0 \cdot \bar{\tau}_{opt} \cdot R \quad (8)$$

式中, R 为探测器的辐射功率响应增益。

目标的数字输出灰度为

$$G = a \cdot V + B = a \cdot A_0 \cdot \bar{\tau}_{opt} \cdot R \times \{[L_0(T) \cdot \Omega + L_b(\omega - \Omega)] \cdot \tau_{atm} + L_{path} \cdot \omega\} + B \quad (9)$$

式中, a 为光电系统的增益系数, B 为系统的噪声偏置。

将式(5)代入式(9)后得

$$G = a \cdot V + B = a \cdot A_0 \cdot \bar{\tau}_{opt} \cdot R \times \{[L_0(T) \cdot \Omega + L_b(\omega - \Omega)] \cdot \tau_{atm} + L_{path} \cdot \omega\} + B \quad (10)$$

对于特定的红外辐射测量系统, a 、 $\bar{\tau}_{opt}$ 、 R 和 A_0 均为常数, 则式(10)可以变为

$$G = k \cdot \{[L_0(T) \cdot \Omega + L_b(\omega - \Omega)] \cdot \tau_{atm} + L_{path} \cdot \omega\} + B \quad (11)$$

式中, $k = a \cdot A_0 \cdot \bar{\tau}_{opt} \cdot R$ 。则目标的辐射亮度为

$$L_0(T) = \frac{G - B}{k \cdot \bar{\tau}_{atm} \cdot \Omega} - \frac{L_{path} \cdot \omega}{\bar{\tau}_{atm} \cdot \omega} - \frac{L_b(\omega - \Omega)}{\Omega} \quad (12)$$

式(12)同时适用于对点目标与面目标的测量。在获取了目标的红外图像 G 并经大气传输修正得到了 $\bar{\tau}_{opt}$ 、 L_{path} 和 L_b 之后, 通过上述推导可以获得一种通用的红外辐射特性测量技术。

3 实验数据处理

为验证上述方法的可行性, 我们采用口径为 600 mm 的中波红外辐射测量系统分别对点源与面源进行辐射测量精度验证。表 1 列出了该系统的相关参数。

表 1 红外辐射测量系统参数

参数	数值
波段	3.7~4.8 μm
系统口径	600 mm
焦距	1200 mm
像元数	640×512
像元大小	15 μm
位深	14

采用 700 mm×700 mm 大小的面源黑体对系统进行辐射定标, 使黑体的有效辐射面完全覆盖系统的入瞳和视场。定标外场场景如图 4 所示。通过设置不同的积分时间, 得到了中波红外辐射测量系统在不同积分时间下的定标结果(见图 5)。拟合结果表明, 该系统在各个积分时间下都具有良好的线性度。然后进一步对整个系统的靶面进行了分析。整个靶面的成像均匀度效果如图 6 所示。结果表明, 该系统具有良好的均匀度, 可提高目标提取精度。表 2 列出了此系统在各个积分时间下的定标方程。

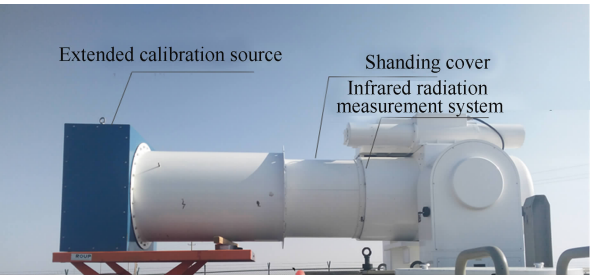


图 4 辐射定标现场

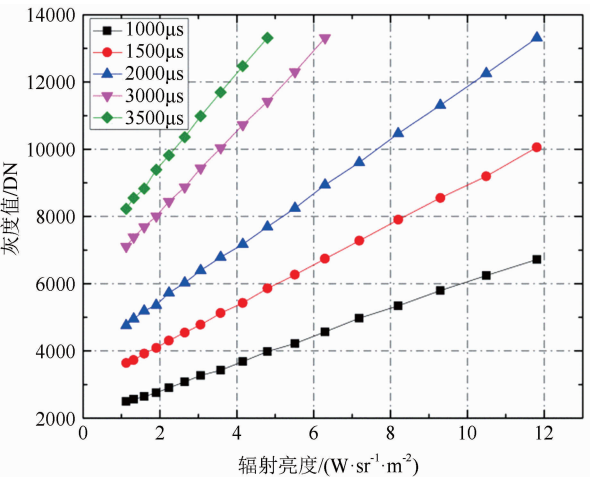


图 5 辐射定标结果

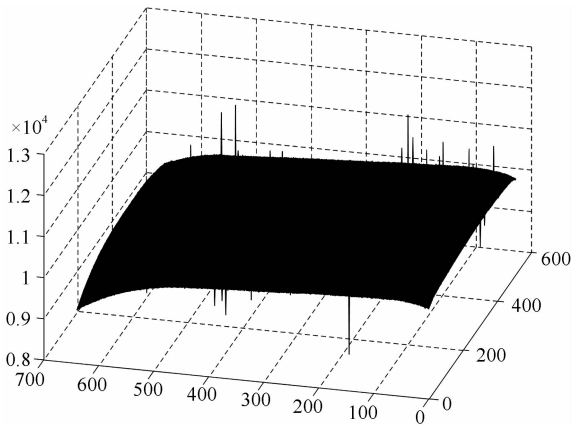


图 6 标定图像的均匀性

表 2 不同积分时间下的定标方程

波段	t/μs	定标方程
中波	1000	$y=340.4967x+1189.1743$
	1500	$y=509.9026x+1746.3676$
	2000	$y=678.2313x+2299.8533$
	3000	$y=1024.1158x+3386.4619$
	3500	$y=1209.0596x+3886.9424$

在红外辐射测量期间, 我们进行了大气传输修正。表 3 列出了所用的主要硬件。其中, 自动气象站测量的环境温度为 15 ℃, 大气压强为 856 hPa, 空气环境湿度为 20%; 能见度仪测量的能见度为 23 km; 激光雷达给出了大气气溶胶的消光廓线; 太阳辐射计给出了水汽数据。利用 MODTRAN 大气传输修正软件算得的大气透过率和路径辐射亮度为

$$\begin{cases} \tau_{atm} = 0.7399 \\ L_{path} = 0.1942 \end{cases}$$

辐射测量实验分别采用 300 mm×300 mm 和 10 mm×10 mm 的标准黑体(见图 7(a)和图 7(b))来模拟点目标和面目标。实验中黑体与测量系统之间的距离为 710 m。通过调焦来实现对目标的清晰成像。图 8 为所获取的目标图像。

在积分时间为 2000 μs 和 3000 μs 时分别采集不同温度下的目标图像。采用上述方法并结合大气透过率和路径辐射数据对目标的辐射亮度进行了反演(实验数据见表 4)。结

表 3 大气传输修正系统

名称	激光雷达	太阳辐射计	自动气象站	能见度仪
图片				

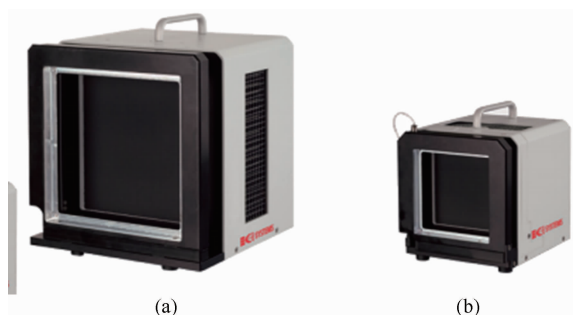


图 7 用于模拟的点源与面源黑体



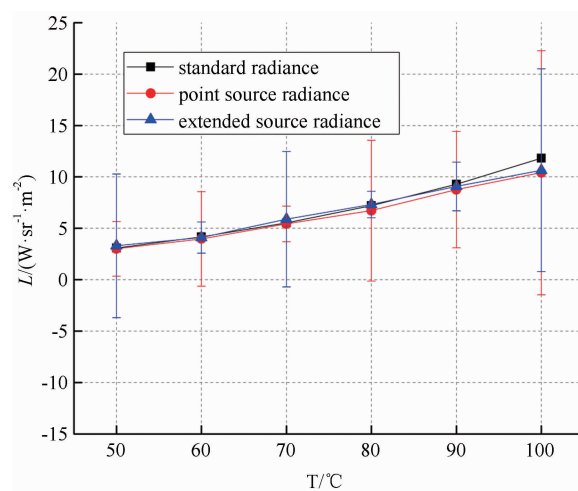
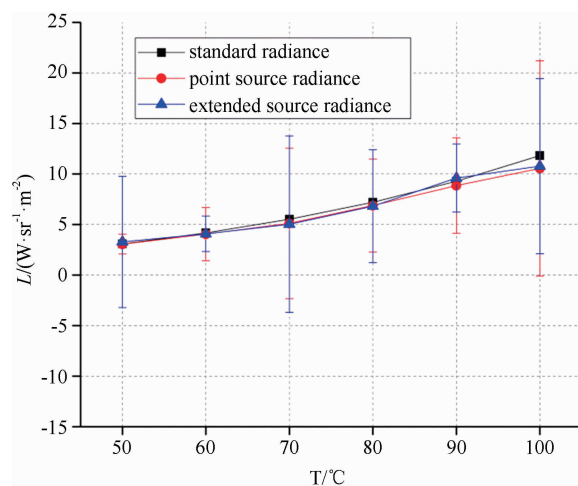
图 8 测量实验所获的图像

果表明,当积分时间为 $2000\ \mu\text{s}$ 时,点目标和面目标的均方根误差分别为 6.47% 和 5.75% (见图 9);当积分时间为 $3000\ \mu\text{s}$ 时,点目标和面目标的均方根误差分别为 6.93% 和 6.31% (见图 10)。可以看出,总体误差表现良好,能够满足辐射测量任务的精度要求。

4 结论

本文推导了红外辐射定标的基本原理,并针对点目标与面目标辐射反演问题提出了一种通用的红外辐射测量技术。然后采用口径为 $600\ \text{mm}$ 的中波红外辐射特性测量系统对点目标和面目标进行了辐射反演验证。试验结果表明,本文方法在保证精度的情况下实现了对点

目标与面目标的辐射反演,并简化了红外辐射特性数据的处理过程,因此具有一定的工程应用价值。

图 9 在积分时间为 $2000\ \mu\text{s}$ 时两种目标的辐射测量比对结果图 10 在积分时间为 $3000\ \mu\text{s}$ 时两种目标的辐射测量比对结果

参考文献

- [1] 刘立拓,余西龙,陈宏,等. 高超声速飞行目标尾焰红外辐射测量[J]. 气体物理, 2017, 2(2): 47-53.

表 4 辐射测量结果比较

t / μs	T / $^{\circ}\text{C}$	标准辐射亮度 $L/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	点目标辐射亮度 $L/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	误差(点 目标)/%	面目标辐射亮度 $L/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	误差(面 目标)/%
2000	50	3.0846	3.003	-2.65	3.30006	6.99
	60	4.1615	3.970	-4.60	4.0982	-1.52
	70	5.5209	5.4247	-1.74	5.8846	6.59
	80	7.2124	6.7185	-6.85	7.3058	1.29
	90	9.2898	8.7631	-5.67	9.0705	-2.36
	100	11.8104	10.409	-11.87	10.6456	-9.86
3000	50	3.0846	3.0543	-0.98	3.2851	6.50
	60	4.1615	4.0526	-2.62	4.0881	-1.76
	70	5.5209	5.1103	-7.44	5.0396	-8.72
	80	7.2124	6.8802	-4.61	6.8095	-5.59
	90	9.2898	8.85012	-4.73	9.6034	3.38
	100	11.8104	10.5503	-10.67	10.7869	-8.67

- [2] 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): 123-129.
- [3] 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.
- [4] 李周. 地基靶场红外辐射特性测量系统宽动态辐射测量研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [5] 黄智国. 空间目标地基红外探测技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
- [6] Vigil M L, Witte D J, Levan P D, et al. Sensor suite for the Advanced Electro-Optical System (AEOS) 3.6 m telescope [C]. *SPIE*, 1996, **2819**: 258062.
- [7] 孙航. 大口径红外辐射特性测量设备目标识别

与跟踪关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.

- [8] Cohen M, Walker R G, Barlow M J, et al. Spectral irradiance calibration in the infrared. I. Ground-based and IRAS broadband calibrations [J]. *The Astronomical Journal*, 1992, **104**(4): 1650-1657.
- [9] 包醒东, 余西龙, 毛宏霞, 等. 基于理论解析方法的高真空羽流流动及红外辐射研究 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49** (1): 131-138.
- [10] 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.
- [11] 孙志远, 常松涛, 朱玮, 等. 应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标 [J]. *光学精密工程*, 2015, **23** (2): 356-362.

(上接第 28 页)

- [2] 姚琴芬, 顾国华. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测算法 [J]. *红外技术*, 2012, **34** (8): 441-443.
- [3] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择 [J]. *红外技术*, 2013, **35** (1): 1-8.
- [4] 李怀琼, 陈钱, 高文昆. 红外焦平面阵列失效元动态检测与校正算法 [J]. *红外与激光工程*,

2006, **35** (2): 192-196.

- [5] 徐鹏霄. HgCdTe 表面/界面光电特性研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 红外焦平面阵列参数测试方法 GB/T 17444-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.