

采用参考源法实现船舶红外辐射特性的测量

刘新明^{1**}, 李周^{2*}, 陈德明¹, 蔡立华², 王前学¹

¹中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 船载以及海岸目标的辐射特性测量是目标红外辐射特性测量领域的重要组成部分, 采用传统模式修正大气透过率远远满足不了红外辐射特性测量精度的要求。为了最大限度地提高辐射特性测量的精度, 提出了基于参考源测量目标辐射特性的方法, 并利用口径为 600 mm 的长波红外辐射特性测量系统, 在近海岸进行红外辐射特性测量实验。结果表明: 该方法的辐射测量误差可减小到 4.31%, 优于传统方法的反演精度。

关键词 探测器; 红外线; 红外辐射特性测量; 辐射定标; 大气透过率; 大气衰减

中图分类号 TN216

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.230401

Measurement of Infrared Radiation Characteristics of Ship Based on Reference Source Method

Liu Xinming^{1**}, Li Zhou^{2*}, Chen Deming¹, Cai Lihua², Wang Qianxue¹

¹China Satellite Maritime Tracking and Controlling Department, Jiangyin, Jiangsu 214431, China;

²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract The measurement of infrared radiation characteristics of ship and coastal targets is among the most important components of target infrared radiation characteristic measurements. The traditional ground model corrects only the atmospheric transmittance, so the measurement error of the target cannot meet the measurement requirements of infrared radiation characteristics. This study proposes a method that measures the target radiation characteristics based on reference sources to maximize the measurement accuracy. Experiments for infrared radiation characteristic measurements are conducted near the coast by using a long-wavelength infrared radiation characteristic measurement system with an aperture of 600 mm. Experimental results confirm that the proposed method reduces the radiation measurement error to 4.31%, which is higher than the inversion accuracy of the traditional method.

Key words detectors; infrared; measurement of infrared radiation characteristics; radiation calibration; atmospheric transmittance; atmospheric attenuation

OCIS codes 040.3060; 110.3080

1 引言

目标光学特性是目标特性的重要组成部分。目标光学特性主要包括飞行姿态、反射率、偏振特性、光谱特性、辐射特性等。在纵向空间分布上, 可将不同类型的目标分为地面目标、海上目标、空中目标和空间目标。现代靶场光学测控技术的深入发展, 特别是新型红外光电设备的不断更新与

应用, 使得目标辐射特性的测量精度越来越高, 数据的应用价值凸显, 目标红外辐射特性数据的获取占据了光学特性测量的重要位置。目标红外辐射特性测量主要是实现短波(1~3 μm)、中波(3~5 μm)、长波(8~12 μm)目标辐射量的定量反演与测量。海上目标的红外辐射特性测量主要是针对近海岸重要设施和海上船只的测量, 虽然不同船舶的指标性能有所差异, 但它们具有一定的红外

收稿日期: 2018-04-15; 修回日期: 2018-06-02; 录用日期: 2018-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(51675506)

* E-mail: 15500027661@163.com; ** E-mail: 13861639271@163.com

辐射规律。获取典型船舶的红外辐射特性反演数据后对其进行数据统计,可将统计结果用于相关系统的鉴定和考核^[1-4]。

一直以来,美、俄等世界军事强国都极为重视目标光学辐射特性的测量和典型目标光学数据库的建立,并将它们作为反导战略的重要组成部分。在红外波段,空中目标飞行加速等环节的热辐射特性具有一定的规律性和重复性。美、俄等军事强国在目标辐射特性的测量方面,基本建立了涵盖紫外、可见光、中波红外、长波光红外的目标辐射特性测量系统;在空间载荷方面,建立了地基辐射测量系统,机载、球载辐射测量系统,以及星载辐射特性测量系统的立体化测量监视系统。时至今日,美、俄等军事强国测控系统网基本完成了辐射特性测量系统宽波段立体化的构建^[5-9]。我国目标光学测控系统的建设虽然在近些年蓬勃发展,但是在数据库建立与探测器的探测性能方面,与世界军事强国之间存在较大差距。

海上舰载目标的辐射特性测量不同于空间、空中目标的红外辐射特性测量。测量空间目标的辐射特性时,观测俯仰角相对较大,适合采用大气传输修正模型进行修正;并且,测量空间目标的辐射特性时可以利用红外星对大气衰减进行修正,得到精度较高的目标辐射特性。测量舰船和近海目标的辐射特性时,仰角较小,空气分子和气溶胶浓度受空气对流因素影响含量剧烈,无法满足辐射传输修正的精度要求。鉴于此,本文提出了一种基于参考源法实现船舶及近海岸目标的辐射特性测量方法,该方法主要利用参考源来实现大气衰减和程辐射的修正,从而实现目标本征辐射亮度的反演。

2 红外辐射特性的测量原理与精度分析

2.1 测量原理

海上目标发出的红外辐射在大气传输过程中能被红外辐射特性测量系统获取,系统接收的能量包括三部分:目标自身发射的辐射能 $L(T_0)$,其中 T_0 为目标温度;目标表面反射的周围环境的辐射能 $L(T_b)$,其中 T_b 为目标周围环境背景的辐射温度;目标与辐射特性测量系统之间的路径辐射能 $L(T_{path})$,其中 T_{path} 为目标与辐射特性测量系统之间的辐射温度。船载红外辐射特性测量原理如图1所示^[10-12]。

为了便于研究,假设目标为朗伯辐射灰体,则目

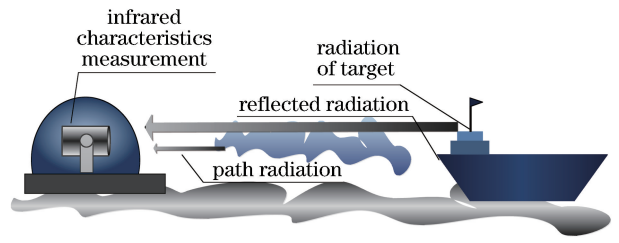


图1 船载红外辐射特性测量原理

Fig. 1 Principle of measurement for infrared radiation characteristics of ship

标表面的辐射亮度 $L_1(T)$ 为

$$L_1(T) = \epsilon L(T_0) + \rho L(T_b), \quad (1)$$

式中: T 为温度; ϵ 为目标灰体的发射率,该参数为常数; ρ 为目标的反射率。

经大气传输衰减与大气热辐射的混叠后,到达红外辐射特性测量系统的辐射能 $L_2(T)$ 满足

$$L_2(T) = \tau_{atm} L_1(T) + L(T_{path}), \quad (2)$$

式中: τ_{atm} 为大气透过率。在探测器上,辐射能与成像灰度之间的关系为

$$G = R[\tau_{opt} L_2(T)] + B, \quad (3)$$

式中: G 为成像灰度; R 为系统的响应增益。系统的光电响应率; τ_{opt} 为光学系统的透过率; B 为系统探测器的噪声响应灰度。对(3)式进行变换,得到

$$L(T_0) = \frac{G - B - RL(T_{path}) - R\rho L(T_b)\tau_{atm}}{\tau_{atm}R\epsilon}. \quad (4)$$

在(4)式中, R 和 B 可以通过辐射定标得到。现阶段,辐射定标方面的研究已相对成熟,对于大口径辐射光电测量系统,常采用近距离面源定标法和平行光管定标法进行定标。本文采用定标精度更高的近距离面源定标法。利用大气传输修正系统,给出 τ_{atm} 和 $L(T_{path})$ 的测量结果。如果给出了目标材料或涂层的属性,即可准确地获得目标的辐亮度特性。将各子系统获得的测量参数代入(4)式,即可反演得到目标表面的辐射亮度温度等特性^[13-14]。

2.2 测量精度分析

目标红外辐射特性的测量精度会受到多种因素的影响。红外辐射特性测量的误差主要来自于系统辐射定标误差、大气传输修正误差和反演算法误差。对于静态目标,暂不考虑反演算法误差。

1)辐射定标误差。影响红外辐射测量辐射定标精度的因素主要包括辐射黑体温度精度和均匀性误差、光学系统透过率测量误差、红外探测器稳定性可重复测量误差、中性滤光片衰减因温度变化而引起的误差等。在目标红外辐射测量中,辐射定标误差

约占 10%。

2) 大气传输修正误差。大气传输修正误差主要是指由大气测量设备反演气溶胶廓线和气体参数产生的误差而导致的采用模式计算得到的大气透过率存在的误差。测量的参数主要包括太阳辐射计测量的水汽总量变化误差、实际测量中当地 CO_2 气体含量变化引起的误差、观测方向上 O_3 气体含量变化引起的误差、激光雷达气溶胶消光系数误差等。大气传输修正误差约为 20%。

由上述分析可见,大气传输修正的优劣对目标红外辐射特性测量的精度具有重要影响。

3 参考源法实现红外辐射特性测量

如果存在两个参考源,温度分别设置为 T_1 和 T_2 ,根据普朗克公式可以计算得辐射亮度为 $L(T_1)$ 和 $L(T_2)$ 。根据红外辐射特性测量原理可得

$$\begin{cases} G(T_1) = \tau_{\text{atm}} R_{ij} L(T_1) + R_{ij} L(T_{\text{path}}) + B \\ G(T_2) = \tau_{\text{atm}} R_{ij} L(T_2) + R_{ij} L(T_{\text{path}}) + B \end{cases} \quad (5)$$

式中: $G(T_1)$ 为 T_1 温度下,对应系统的输出灰度值; $G(T_2)$ 为 T_2 温度下,对应系统的输出灰度值; R_{ij} 为探测器靶面第 i 行、第 j 列的系统响应增益。

根据(5)式可以得到大气透过率 τ_{atm} 为

$$\tau_{\text{atm}} = \frac{G(T_2) - G(T_1)}{R_{ij} [L(T_2) - L(T_1)]} \quad (6)$$

同理,根据(5)式可以得到观测方向的程辐射 L_{path} 为

$$L_{\text{path}} = \frac{G(T_2) - G(T_1)}{R_{ij}} - \tau_{\text{atm}} L(T_1) \quad (7)$$

由此即可实现大气传输修正。本文提出的参考源修正法适用于近海岸和船舶目标等小仰角或水平目标的辐射反演,无需大气传输测量设备,并且大气传输修正计算节约了成本和时间,提高了效率,但需要对船舶和海岸目标建立数据库。

4 红外辐射特性测量实验

为了验证本文提出的参考源修正法对船舶目标进行红外辐射特性测量反演的精度,利用某口径为 600 mm 的长波红外辐射特性测量系统进行实验验证。图 2 所示为大口径红外辐射特性测量系统。该系统的规格指标如表 1 所示,其中 NETD 为相机的等效噪声温差, F 为光圈数。

红外辐射定标和合作参考目标采用以色列 CI 公司生产的高精度黑体,表 2 所示为定标黑体的参数。



图 2 大口径红外辐射特性测量系统

Fig. 2 Large-aperture infrared radiation characteristic measurement system

表 1 红外辐射特性测量系统的规格指标

Table 1 Indexes of in frared radiation characteristic measurement system

Aperture / mm	Focal / mm	Wavelength / μm	Pixel number	F	Bit	Pixel size / μm	Refrigeration mode	NETD / (10^{-3} K)	Frame number / Hz
600	1200	7.7~9.3	640×512	2	14	15	Stirling	25	100

表 2 定标黑体的参数

Table 2 Parameters of calibration blackbody

Size / (mm×mm)	Emissivity	Uniformity	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Voltage / V	Power / kW
700×700	0.97	0.1	0-600	380	10

在实验中,系统在多个积分时间 t (100, 150, 200, 300, 350 μs) 下进行定标,选择定标黑体温度为 30~110 $^{\circ}\text{C}$,温度步长为 10 $^{\circ}\text{C}$,定标结果如图 3 所示。由图 3 可知,该系统具有良好线性响应度。

各积分时间下的定标误差如图 4 所示。由图 4 可知,各积分时间下的系统定标误差远小于 10% 的要求。

表 3 所示为实验定标曲线给出的各积分时间下

的系统的平均定标误差。由表 3 可知,该系统具有良好的线性度且线性区间较大,适合于高精度的辐射定标,系统定标结果稳定,且定标精度较高,在各积分时间下平均定标误差的最大值仅为 0.51%。

为了验证参考源法测量辐射特性的精度,在海上进行目标的红外辐射特性测量实验。考虑到海上目标搭载系统的船摇问题,实验在近海岸进行,只能在水平方向将标准辐射黑体放置在距红外辐射特性

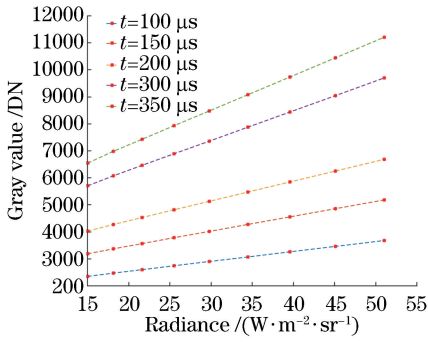


图3 不同积分时间条件下的辐射定标结果
Fig. 3 Results of radiation calibration with different integration time

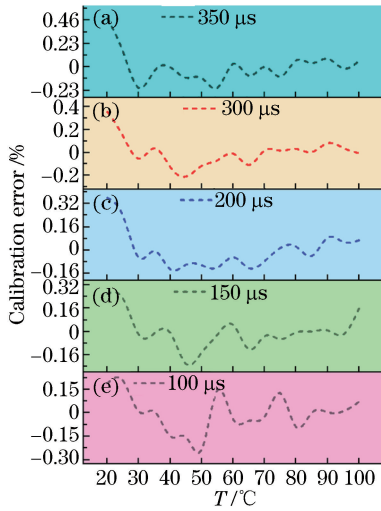


图4 不同积分时间下的定标误差。(a) $t = 350 \mu\text{s}$;
(b) $t = 300 \mu\text{s}$; (c) $t = 200 \mu\text{s}$; (d) $t = 150 \mu\text{s}$;
(e) $t = 100 \mu\text{s}$
Fig. 4 Calibration error under different integration time.
(a) $t = 350 \mu\text{s}$; (b) $t = 300 \mu\text{s}$; (c) $t = 200 \mu\text{s}$;
(d) $t = 150 \mu\text{s}$; (e) $t = 100 \mu\text{s}$

测量系统一定距离处,近海岸的温度为 $15\text{ }^\circ\text{C}$,良好

表4 外场测试基本条件

Table 4 Basic condition of outfield test

Temperature / $^\circ\text{C}$	Atmospheric pressure /Pa	Relative humidity /%	Visibility /km	Distance /m	Elevation angle / $(^\circ)$
15	8.56×10^4	20	23	870	0

表5 红外大气传输修正数据

Table 5 Corrected data of infrared atmospheric transmission

$t / \mu\text{s}$	τ_{atm}	$L_{\text{path}} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$
100	0.7166	3.1560
150	0.7421	3.1670
200	0.7272	3.0459
300	0.7345	3.0150
350	0.7414	3.2780
Average	0.7323	3.1323

表3 不同积分时间条件下的系统平均定标误差

Table 3 System average calibration errors under different integration time

$t / \mu\text{s}$	100	150	200	300	350
Average calibration error /%	0.48	0.51	0.46	0.46	0.45

天气情况下的能见度为 23 km ,实验测量距离为 870 m 。由于黑体的温度和发射率已知,因此通过普朗克公式可计算得到标准的辐射亮度。目标和参考源在同一位置,实验场景如图5所示。在实验过程中,外场测试基本条件如表4所示。

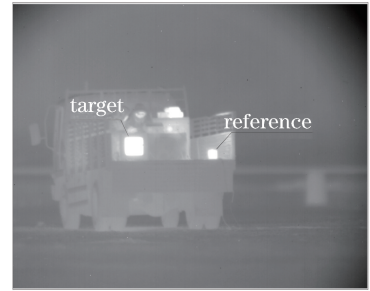


图5 红外辐射特性测量实验场景

Fig. 5 Experimental scene for infrared radiation characteristic measurement

利用美国空军实验室开发的高精度大气传输修正软件 MODTRAN,计算长波的大气透过率 τ_{atm} 和程辐射 L_{path} ,结果为

$$\begin{cases} \tau_{\text{atm}} = 0.9260 \\ L_{\text{path}} = 0.6992^\circ \end{cases} \quad (8)$$

为了尽量减小红外辐射测量系统误差的影响,在辐射黑体条件不变的情况下,红外辐射测量系统在不同的积分时间(100,150,200,300,350 μs)下采集图像。通过参考源计算得到透过率和程辐射,结果如表5所示。

基于红外辐射特性测量的基本原理,采用大气传输修正系统和本文提出的参考源计算的大气透过率和程辐射对目标进行反演,结果如图6所示。由图6可知,参考源法反演的结果更接近于目标的标准辐射亮度。

实验通过三种方法计算了目标的辐射亮度:由已知温度下的普朗克公式计算得到的标准辐射亮度,利用传统的大气传输修正法反演得到的目标辐射亮度,以及利用本文方法得到辐射亮度。实验结

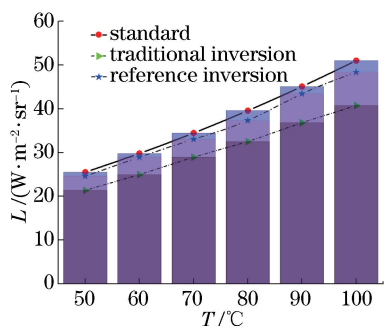


图6 不同方法的辐射反演结果

Fig. 6 Results of infrared inversion by different methods

果表明,采用传统的大气传输修正软件计算的修正误差为16.23%,而采用参考源修正法得到的目标的辐射亮度误差仅为4.31%。由此可知,基于参考源的修正法可以有效地提高目标的辐射测量精度。

5 结 论

本文通过分析船载红外辐射特性测量的需求,提出了一种适用于船载红外辐射特性测量系统对海平面和近海岸等目标的辐射特性进行测量的方法,并采用某口径为600 mm的长波红外辐射特性测量系统进行验证实验。实验结果表明,参考源修正法可以有效地提高辐射特性测量的精度,为海上目标的高精度红外辐射提供了参考,具有一定的工程实践意义。

参 考 文 献

- [1] Li Z. Research on ground-based infrared characteristics measurement systems in wide dynamic range radiometry [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
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: 中国科学院大学, 2018.
- [2] Huang Z G. Research on space target of ground-based infrared detection technology[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
黄智国. 空间目标地基红外探测技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2018.
- [3] Qiao T Y, Cai L H, Li N, *et al.* Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system[J]. Chinese Optics, 2018, 11(5): 804-811.
乔铁英, 蔡立华, 李宁, 等. 基于红外辐射特性系统实现对面目标测量[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 804-811.
- [4] Guo L H, Guo H Z, Yang C Y, *et al.* Improvement

of radiation measurement precision for target by using atmosphere-corrected coefficients [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1871-1877.

郭立红, 郭汉洲, 杨词银, 等. 利用大气修正因子提高目标红外辐射特性测量精度[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1871-1877.

- [5] Zhang Y C, Gao C, Liu J Z, *et al.* Correction of temperature measurement accuracy affected by internal temperature rise in uncooled thermal imager [J]. Chinese Optics, 2018, 11(4): 669-676.
张艳超, 高策, 刘建卓, 等. 非制冷热像仪内部温升对测温精度的影响修正[J]. 中国光学, 2018, 11(4): 669-676.
- [6] Yang H, Zhang Y S, Ding W Z. Detectability of airship infrared detection system to hypersonic vehicle [J]. Chinese Optics, 2016, 9(5): 596-605.
杨虹, 张雅声, 丁文哲. 飞艇红外探测系统探测高超声速目标性能研究[J]. 中国光学, 2016, 9(5): 596-605.
- [7] Wang L, Lin C, Ji Z H, *et al.* Preflight diffuser's calibration of carbon dioxide spectrometer of TanSat [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1967-1976.
王龙, 蔺超, 纪振华, 等. 碳卫星CO₂探测器发射前的漫反射板定标[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1967-1976.
- [8] Zhang Z, Wang W H, Wang H M, *et al.* On-board vicarious calibration of FY-3C UV total ozone unit [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(2): 326-333.
张卓, 王维和, 王后茂, 等. FY-3C卫星紫外臭氧总量探测仪的在轨替代定标[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 326-333.
- [9] Tian Q J. Research on internal stray radiation analysis suppression and measurement technology of infrared theodolite [D]. Beijing: 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]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [10] Lu X F, Zhao H. Identification method of outdoor calibration accuracy of infrared radiation measuring equipment[J]. Infrared, 2019, 40(2): 19-24.
禄晓飞, 赵慧. 红外辐射测量设备外场标定精度鉴定方法[J]. 红外, 2019, 40(2): 19-24.
- [11] Chen C, Yi W N, Cui W Y. Measurement of infrared radiation characteristics of spatial target based on reference source[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8): 0804004.

- 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): 0804004.
- [12] Yin L M, Qiao B, Liu J C, *et al.* Combined radiation calibration method for ground-based infrared radiation measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0412001.
殷丽梅, 乔兵, 刘俊池, 等. 地基红外辐射测量系统联合辐射定标法[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0412001.
- [13] Li X S, Liu H X, Sun J X, *et al.* Relative radiometric calibration for space camera with optical focal plane assembly[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0828006.
李宪圣, 刘洪兴, 孙景旭, 等. 光学拼接焦平面空间相机的相对辐射定标[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0828006.
- [14] Yang H C, Yang B Y, Song M X, *et al.* Onboard polarimetric calibration methods of spaceborne scanning polarimeter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1110002.
杨洪春, 杨本永, 宋茂新, 等. 星载偏振扫描仪的星上偏振定标方法[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1110002.