

基于红外标准星的海基红外辐射特性测量系统标校方法

刘克城, 林 旭, 刘程浩, 耿润涛, 张力元

中国卫星海上测控部, 江苏 无锡

收稿日期: 2025年8月13日; 录用日期: 2025年9月9日; 发布日期: 2025年9月16日

摘 要

为了缩短红外辐射特性测量的准备时间, 以应对突发情况下的拍摄需求。本文提出了一种基于红外标准星的海基红外辐射特性测量系统标定方法。通过捷联惯导系统对船摇进行隔离, 使用经纬仪测量位于不同天区的已知辐射照度的红外标准星, 将测量数据与实际数据拟合得到当时气象环境下的红外辐射特性测量设备的红外辐射响应率与大气参数。对海基红外探测设备具有一定的应用价值。

关键词

红外辐射特性测量, 红外辐射标校, 红外标准星

Calibration Method for Sea Based Infrared Radiation Characteristic System Based on Infrared Standard Star

Kecheng Liu, Xu Lin, Chenghao Liu, Runtao Gen, Liyuan Zhang

China Satellite Maritime Survey and Control Department, Wuxi Jiangsu

Received: Aug. 13th, 2025; accepted: Sep. 9th, 2025; published: Sep. 16th, 2025

Abstract

In order to shorten the preparation time for measuring infrared radiation characteristics and meet the shooting needs in emergency situations. A calibration method for a sea based infrared radiation characteristic measurement system based on infrared standard stars has been proposed. Isolation of ship sway is achieved through a strapdown inertial navigation system, and infrared standard

文章引用: 刘克城, 林旭, 刘程浩, 耿润涛, 张力元. 基于红外标准星的海基红外辐射特性测量系统标校方法[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(5): 819-825. DOI: 10.12677/jsta.2025.135080

stars with known radiation illuminance located in different sky regions are measured using a theodolite. The measurement data is fitted with actual data to obtain the infrared radiation response rate and atmospheric parameters of the infrared radiation characteristic measurement equipment under the meteorological environment at that time. It has a certain application value for sea based infrared detection equipment.

Keywords

Infrared Radiation Characteristic Measurement, Infrared Radiation Calibration, Infrared Standard Star

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 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目标红外特征的依据，也可以作为基础数据用于红外技术研究。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重要观测设备[1]。我单位长期位于海上工作，所采用的红外辐射特性测量设备以海基设备为主。

红外辐射标校是实现红外辐射测量的基础和前提。标校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[2]。我们所能看到的物体均不是理想的黑体辐射源(除部分特殊可以被看作近似黑体的辐射源)。设备接收到的物体辐射为等效黑体辐射特性，需要通过测量来得到，测量需要测量值与目标红外辐射强度的关系，而红外辐射特性测量就是来确定图像灰度值与物体红外辐射强度之间的关系[3]。

为了获取高精度的红外辐射特性测量结果，需要在使用设备前对设备进行标校工作，常见的标校方法为采用黑体进行标校。海基红外辐射特性测量设备安装于船艇上，其内部空间较为有限，黑体升温时对圆顶内部温度影响较大，容易产生红外灰度漂移；同时船艇周边可能伴随有长时间恶劣海况等情况，黑体标校支架可能随船晃动，不利于使用黑体进行红红外外标校[4]。

红外标准星作为一种稳定的红外辐射源，具有高精度、高稳定性等特点，因此在红外测量系统的标校中发挥着重要作用。通过利用红外标准星对海基红外辐射特性测量系统进行标校，可以有效消除系统误差，提高测量精度和稳定性。红外标准星还可以用于评估测量系统的性能，为系统的优化和改进提供有力支持[5] [6]。

2. 红外辐射测量的基本原理

红外恒星以点源目标形式成像，如果不考虑成像弥散现象，自然恒星辐射的能量将全部被一个像元接收。对于在普通气象条件下的目标，进行红外辐射测量时，目标发射的红外辐射在经过大气传输到达探测器时会受到大气衰减的影响。同时，大气自身也具有一定的辐射，这些辐射也会伴随目标辐射一同抵达探测器。因此，探测器所测得的辐射值实际上是经过大气衰减后的目标辐射与大气辐射的叠加(图 1)。

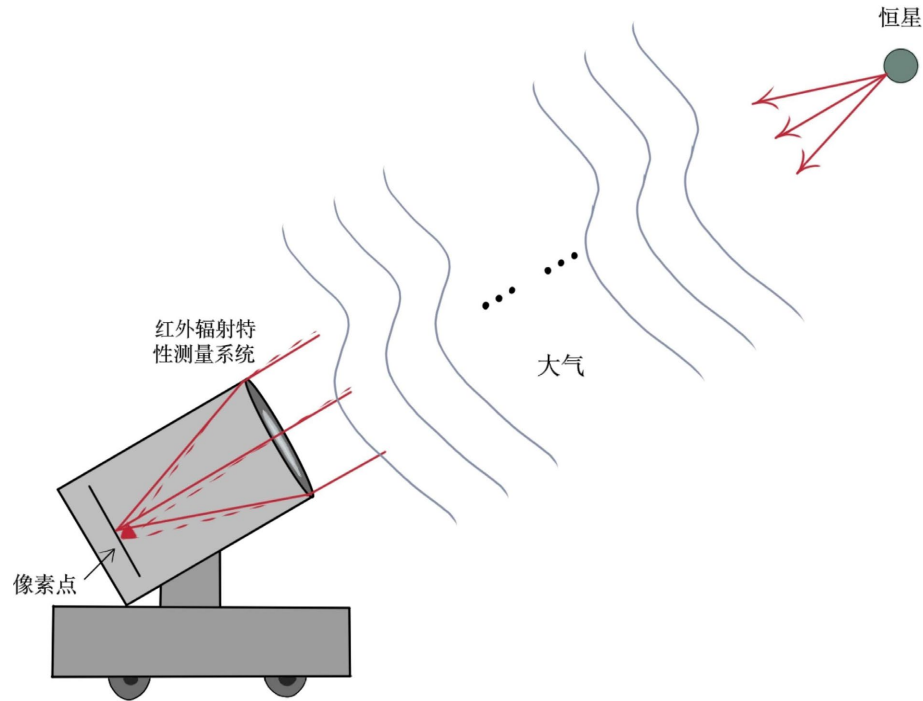


Figure 1. Schematic diagram of infrared standard star imaging
图 1. 红外标准星成像示意图

当红外探测器响应为线性响应时，可以得到探测器对红外目标与大气背景的响应方程式分别为 [7]-[9]:

$$G_t = R \cdot (\tau \cdot E_t + E_a) + B_0 \quad (1)$$

$$G_a = R \cdot E_a + B_0 \quad (2)$$

其中， G_t 为对红外恒星目标成像时，探测器的输出灰度值； G_a 为对周围大气背景成像时，探测器的输出灰度值； R 为光学系统辐射照度响应率； τ 为天顶角处的大气透过率； E_t 为测量目标的红外辐射照度； E_a 为大气背景的辐射照度； B_0 探测器像元灰度响应偏置。其中大气背景辐射照度无法测量，所以需要进行去除，将(1)式与(2)式相减后得到：

$$\Delta G = G_t - G_a = R \cdot \tau \cdot E_t \quad (3)$$

假设大气是由许多平行的平面层叠加而成的，那可以得到某一观测仰角的大气透过率公式是：

$$\tau_\theta = t \cdot \exp(-\kappa \cdot m(\theta)) \quad (4)$$

其中， $\exp(-\kappa \cdot m(\theta))$ 为大气消光系数，大气透过率会随着经纬仪观测仰角减小而增大，当经纬仪观测仰角为天顶方向时，消光系数最小； t 为大气透过率系数； κ 为天顶方向上的大气光学厚度； $m(\theta)$ 为大气质量，在天顶距 θ 小于 75° 的情况下， $m(\theta)$ 的值近似等于 $\sec \theta$ [10] [11]。

将(4)式中的透过率带进(3)式后，再对新方程取对数可以得到：

$$\ln \left(\frac{\Delta G}{E_t} \right) = -\kappa \cdot \sec \theta + \ln(R \cdot t) \quad (5)$$

由公式可以得知，如果我们需要得到红外辐射特性测量系统的红外辐射响应率与天顶方向上的大气光学厚度，我们可以通过在测量任务前后 15 min，保证大气条件变化较小的情况下，使用红外探测器快

速拍摄多颗不同位置的红外标准星,记录下红外标准星的天顶距,筛选出天顶距小于 75° 的红外标准星数据。 ΔG 使用拍摄图像上的目标灰度值减去背景灰度值得到,红外标准星的 E_t 为已知量通,过将数据带入(5)式中可以得到一系列将 $\ln\left(\frac{\Delta G}{E_t}\right)$ 与 $\sec\theta$ 关联起来的点,对这些点进行最小二乘法拟合之后,可以得到以 $\ln\left(\frac{\Delta G}{E_t}\right)$ 为纵坐标, $\sec\theta$ 为横坐标, $-\kappa$ 为斜率, $\ln(R \cdot t)$ 为截距的线性关系。将得到的 κ 的值代入 $\exp(-\kappa \cdot m(\theta))$ 即可得到在 θ 天顶距下的大气消光。将大气透过率系数代入 $\ln(R \cdot t)$ 即可得到光学系统辐射照度响应率。将已知量代入(3)式,即可得到待测目标的红外辐射照度 E_t 。空间目标的红外辐射强度可以通过已知的距离 L 进行计算,计算公式为 $I = E_t \cdot L^2$ 。

3. 船摇隔离方法

在陆基平台中,跟踪红外标准星只需要知道赤经赤纬后换算到大地坐标系中、俯仰值就可以跟踪捕获目标。但是在海基平台上,受船摇、航向等因素影响,仅靠大地坐标系中的方位、俯仰值无法发现目标,这对海基平台的红外标准星观测带来了不利影响。

同时根据红外定标的原理,是在设定积分时间内对目标进行图像采集,建立采集到的目标灰度值与目标辐射强度之间的模型。但由于船摇影响,恒星在探测器视场内来回移动,采集到的恒星目标图像并非是常规的点目标图像,而是类似短线段的图像,造成图像整体灰度值降低,降低了模型的准确性。

因此,我们引入了捷联惯导来对船摇进行隔离,保证探测器能够以与陆基探测器相仿的情况进行红外标准星的观测。

在使用过程中,探测器系统利用捷联惯导提供的船体横摇角 θ 、纵摇角 ψ 和航向角 K 信息,利用坐标转换,将目标在大地坐标系下的方位、俯仰角经换算后得到大地坐标系下的理论位置,再叠加船体横摇、纵摇、航向后生成目标在甲板直角坐标系下的位置,再转换为探测器方位俯仰值公式如下:

$$\begin{cases} X_g = D \cos E \cos A \\ Y_g = D \sin E \\ Z_g = D \cos E \sin A \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A_c = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos E [\cos \theta \sin(A-K) + \sin \theta \sin \psi \cos(A-K)] - \sin E \sin \theta \cos \psi}{\cos E \cos \psi \cos(A-K) + \sin E \sin \psi} \right\} \\ E_c = \sin^{-1}(Y_c/D) \end{cases} \quad (7)$$

其中, X_c 、 Y_c 、 Z_c 分别为甲板直角坐标系下的星体理论坐标, X_g 、 Y_g 、 Z_g 为大地坐标系下星体的理论位置, E 为目标在大地坐标系下的方位值, A 为目标在大地坐标系下的俯仰值, D 为星体到坐标原点的距离。

根据探测器坐标系定义,在甲板直角坐标系下的目标位置换算探测器方位、俯仰角的关系为:

$$\begin{cases} A_c = \tan^{-1}(Z_c/X_c) \\ E_c = \sin^{-1}(Y_c/D) \end{cases} \quad (8)$$

其中, A_c 为目标位置换算后的探测器方位角, E_c 为目标位置换算后的探测器俯仰角。

综合(6)~(8)三个式子可得:

$$\begin{cases} A_c = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos E [\cos \theta \sin(A-K) + \sin \theta \sin \psi \cos(A-K)] - \sin E \sin \theta \cos \psi}{\cos E \cos \psi \cos(A-K) + \sin E \sin \psi} \right\} \\ E_c = \sin^{-1}(Y_c/D) \end{cases} \quad (9)$$

4. 红外标准星选择

红外标准星在红外辐射测量中是极其重要的。其稳定的红外辐射特性使得它成为红外辐射测量系统标校的可靠基准。对于海基红外辐射特性测量系统而言,选择红外标准星的依据主要有三点。一是恒星的光谱流密度要稳定,不能随时间发生变化,否则在后期使用过程中会出现偏差。二是恒星的星等与俯仰角在红外辐射特性测量系统的工作范围内。三是恒星光谱波段覆盖了红外辐射特性测量系统工作波段。

现在广泛使用的红外恒星光谱数据库中有约 620 颗亮星,覆盖整个天空网络。这些恒星的光谱波长范围为 1.2~35 μm ,其中大部分恒星的波长分辨率可以达到 0.05 μm ,光谱准确度优于 2%。

获取到红外标准星的光谱流量密度后,对其在红外辐射特性测量系统工作波段范围内的部分进行积分处理,就可以得到红外标准星的辐射照度,通过拍摄多组目标进行计算拟合就可以得到定标方程。

$$E_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

其中 $E(\lambda)$ 代表该波段下的红外标准星光谱流量密度, $R(\lambda)$ 代表红外辐射特性测量系统该波段下的相对光谱响应率。 λ_1 、 λ_2 为红外辐射特性测量系统的工作波段范围。

5. 试验验证

在红外辐射特性测量系统稳定后进行拍摄,减小温度漂移对系统产生的影响。同时拍摄前利用天空背景对红外辐射特性测量系统的探测器进行单点校正,保证成像质量。校正时,天空背景保证干净,无云、雾等干扰。校正完毕的探测器可以预先拍摄一组图像,检查校正情况,以免出现坏点等干扰测量结果。完毕后应迅速实验,以免环境变化对设备测量产生干扰,同时拍摄活动应尽量在夜间进行,以避免阳光对探测器的影响。

实验当日,根据系统工作波段与成像情况选取可观测恒星 10 颗。选取有效数据见表 1。

Table 1. Infrared standard star parameters

表 1. 红外标准星参数

编号	俯仰($^{\circ}$)	辐射照度(W/m^2)
1	30.71	1.243×10^{-10}
2	35.62	3.156×10^{-11}
3	41.28	3.098×10^{-11}
4	47.79	1.223×10^{-11}
5	52.23	7.408×10^{-11}
6	56.62	7.556×10^{-11}
7	63.57	8.325×10^{-11}
8	68.99	1.577×10^{-11}
9	70.02	1.362×10^{-11}
10	72.33	2.349×10^{-11}

探测器采取恒星图像一般采用合成孔径法，首先对拍摄图像进行灰度处理，对处理后的图像通过在所拍摄恒星周围环形区域内采取天空背景的平均灰度值，此时环形区域应保证面积尽可能大，以防大气弥散效应等对背景均值计算造成影响。在取得天空背景均值后，对目标恒星灰度值进行天空背景扣除，得到该恒星实际输出灰度值。将 10 颗恒星的测量结果放入以为纵坐标，为横坐标的坐标系中，采用最小二乘法进行拟合后结果如图 2 所示。其中 κ 为 0.2779， $\ln(R \cdot t)$ 为 39.02。

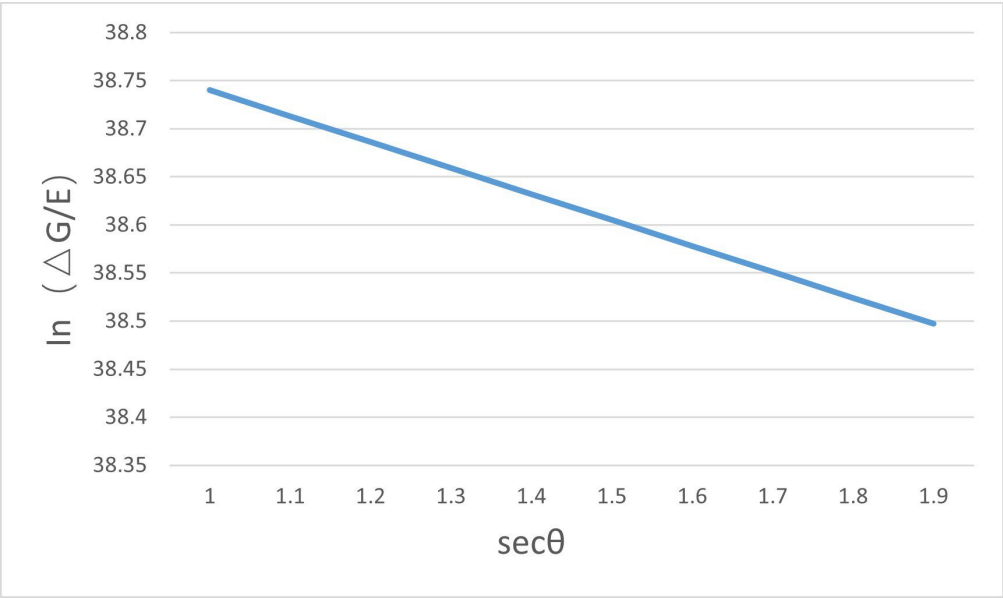


Figure 2. Calibration Fitting curve
图 2. 标校拟合曲线

为了确认标校结果精度，采用十颗星中的九颗作为标校星，一颗作为待测星。利用九颗的测量数据重复上述步骤，计算得到系统的红外响应率与大气消光的参数。将待测星的测量数据带入公式中进行计算，得到待测星的红外辐射照度。由此可以得到误差为计算得出的待测星红外辐射照度与待测星真实红外辐射照度之差与待测星真实红外辐射照度的比值。结果如表 2 所示。

Table 2. Result comparison situation
表 2. 结果比较情况

编号	真实辐射照度(W/m ²)	计算辐射照度(W/m ²)	误差(%)
1	1.243×10^{-10}	1.165×10^{-10}	6.3
2	3.156×10^{-11}	3.023×10^{-11}	4.2
3	3.098×10^{-11}	3.179×10^{-11}	2.6
4	1.223×10^{-11}	1.301×10^{-11}	6.4
5	7.408×10^{-11}	7.076×10^{-11}	4.5
6	7.556×10^{-11}	7.655×10^{-11}	1.3
7	8.325×10^{-11}	8.114×10^{-11}	2.5
8	1.577×10^{-11}	1.625×10^{-11}	3.0
9	1.362×10^{-11}	1.208×10^{-11}	11.3
10	2.349×10^{-11}	2.179×10^{-11}	7.2

可以看出,误差平均值为4.9%。效果较好。

6. 结论

本文介绍了一种使用红外标准星的海基红外辐射特性测量系统的快速标校方法。通过在设备使用前拍摄多组不同天顶距的红外标准星图像,来计算得到系统红外响应率与大气消光。相较于以往的外定标方法优点在于能够针对不同环境快速地完成定标。通过数据分析比对整体标校结果误差平均值为4.9%,具有一定使用价值。由于该方法使用恒星作为标校的基准,因此受天气影响较大,在多云天气情况下也会导致传播途径中辐射衰减过大而导致测量值准确率下降;此外由于恒星并非全天可见,因此定标时间也有一定要求,无法做到随时开展。未来可以拓宽星库,除使用红外标准星外,对于近期红外光谱较为稳定的恒星也可纳入星库范围,增加该方法的适应性;也可以将部分红外可见的人造卫星纳入星库范围,人造卫星的红外特性是可以获得的,通过太阳光反射角度等的比对,也可以得到一个较好的模型用于红外标校。

参考文献

- [1] 杨词银, 张建萍, 曹立华. 地基空间目标红外辐射特性测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 304-310.
- [2] 赵晓熠, 张伟, 谢蓄芬. 绝对辐射定标与相对辐射定标的关系研究[J]. 红外, 2010, 31(9): 23-29.
- [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]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [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] 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.
- [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] 李霞, 刘兴润, 佟惠原, 等. 红外恒星辐射在标校中的应用研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(6): 66-68.
- [8] 朱明, 詹杰. 利用恒星辐射测量整层大气透过率的多目标星定标[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2843-2847.
- [9] 詹杰, 郭瑞鹏, 黄宏华, 等. 利用恒星测量整层大气透过率[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1761-1765.
- [10] 李宪圣, 任建伟, 张立国, 万志, 朱启海, 赵贵军. 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(2): 175-178.
- [11] 甘世奇, 武佩剑, 张啸, 裴文凯, 倪群. 一种适用于外场条件的红外系统分区域标定方法[J]. 红外, 2024, 45(1): 36-42.