

文章编号: 1672-8785(2021)08-0007-06

基于短波变 F 数系统的红外辐射 定标规律研究

邹 雨¹ 陈圣义¹ 范超然¹ 李 周^{2,3*} 唐伯浩^{2,3}

(1. 中国人民解放军 63696 部队, 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;

3. 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)

摘 要: 在靶场辐射测量中, 红外辐射特性数据被广泛应用于目标红外特性识别和隐身特性评估, 在安防与军事领域发挥着不可替代的作用。目标红外辐射特性数据获取需基于系统的辐射定标。对于中、长波测量系统来说, 红外辐射定标主要针对定焦系统, 而对变焦系统的辐射标定较少。建立了连续变焦系统的红外辐射定标模型, 并对 1000 mm 口径的短波连续变焦系统进行了分析。数据分析结果显示, 随着 F 数的增大, 系统的辐射响应增益减小。分析了其对辐射测量的影响。可以看出, 该研究具有一定的工程意义。

关键词: 短波红外成像; 连续变焦; 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.1672-8785.2021.08.002

Research on Infrared Radiation Calibration Based on Shortwave Variable F Number System

ZOU Yu¹, CHEN Sheng-yi¹, FAN Chao-ran¹, LI Zhou^{2,3*}, TANG Bo-hao^{2,3}

(1. Unit 63696 of PLA, Jiangyin 214431, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese

Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 3. Key Laboratory of Space-based
Dynamic&Rapid Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Infrared radiation characteristic data is widely used in target infrared characteristic recognition and stealth characteristic evaluation in outfield, and it plays an irreplaceable role in the security and military fields. The acquisition of target infrared radiation characteristic data needs to be based on the system's radiation calibration. For medium- and long-wave measurement systems, infrared radiation calibration is mainly for fixed-focus systems, but the radiation calibration for zoom systems is less. The model of the infrared radiation calibration was established for the continuous zoom system, and the short-wave continuous zoom system with

收稿日期: 2021-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675506)

作者简介: 邹雨(1989-), 男, 江苏泰州人, 工程师, 主要从事测控技术、光学装备应用以及装备管控技术研究。

***通讯作者:** E-mail: 15500027661@163.com

1000 mm aperture was analyzed. Data analysis results show that as the F number increases, the radiation response gain of the system decreases. The analysis of its influence on radiation measurement has certain engineering significance.

Key words: shot-wave infrared imaging; continuous zoom; radiation calibration; infrared detector

0 引言

短波红外(Short-Wave Infrared, SWIR)系统在情报、监视、侦查、军事和安保领域变得越来越重要。短波红外波段通常定义为 $0.9\sim 2.5\ \mu\text{m}$ (见图 1), 主要来源于自然环境反射、高温物体主动辐射以及人造短波光源等。在晴天或者夜天光下, 大部分能量主要集中在短波红外波段。利用天光的反射在夜间可实现对周围环境的成像观测。因此在常温环境下, 短波红外辐射特性主要反映被测目标对周围环境的散射能力(即散射辐射)。其次, 与传统意义的中、长波红外热成像类似, 由普朗克定律和维恩位移定律可知, 当被测目标的温度升至足够高时, 被测目标的短波红外辐射也可以被成像, 此时为目标的自发辐射。人造光源主要是指短波红外激光以及红外发光二极管等等^[1-3]。

从探测系统方面来看, 短波成像系统波长

较短, 其成像结果与可见光图像相似, 因此目标细节表达更清晰, 识别度较高^[4]。其次, 短波红外波段兼有热红外波段的特性, 受大气散射作用小, 透雾、霏、烟尘能力较强, 有效探测距离远, 且对气候条件和战场环境的适应性明显优于可见光成像。在大气辉光的夜视条件下, 光子辐照度主要分布在 $1.0\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 短波红外波段内(具有夜视的可能)^[5-6]。

船载短波红外光电系统可在高水汽、低能见度环境下对远距离目标进行清晰成像。与可见光和热红外探测系统相比, 它具有一定的优势, 其海面成像效果如图 2 所示。因此, 研究短波红外辐射特性, 对建立目标短波散射特性数据库与目标判别具有重要的意义。基于短波红外辐射测量系统的特点, 本文首先介绍红外辐射定标的基本原理, 然后推导变焦系统的辐射定标模型, 最后基于口径为 1000 mm 的短

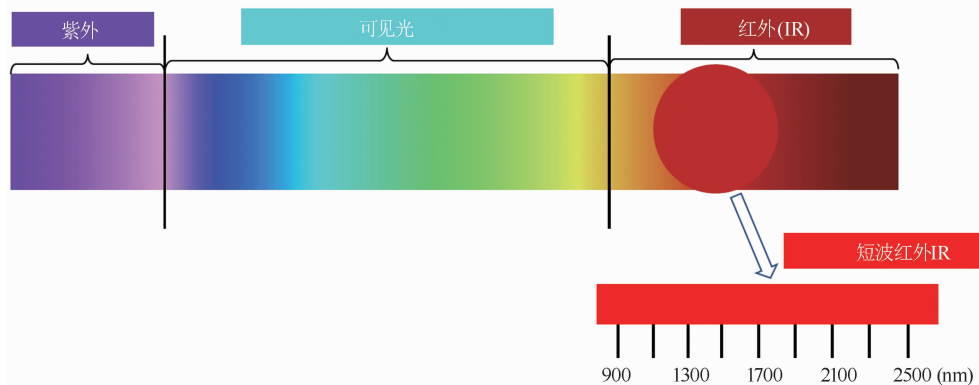


图 1 短波红外波段



图 2 不同波段的海面成像效果

波红外装置验证该系统的辐射变化规律, 从而证实理论推导的有效性。

1 红外辐射定标的基本原理

辐射定标可以有效地消除测量系统自身对辐射测量的影响^[7]。此外, 通过采用标准的辐射定标源, 可以建立辐射输出量与测量系统输出量之间的定量关系。在外场进行目标测量时, 可以根据定标系数实现对目标辐射信息的反演(如辐射亮度和辐射温度等)^[8-10]。

对于地面遥感红外辐射测量系统来说, 常见的定标方式是采用近距离面源黑体定标法(其原理见图 3): 将标准的面源黑体贴近测量系统的光瞳, 使黑体发出的辐射能量被光学系统接收; 调节黑体输出的不同辐射, 得到不同的灰度图像, 此时便可计算系统的定标响应参数, 从而完成定标。

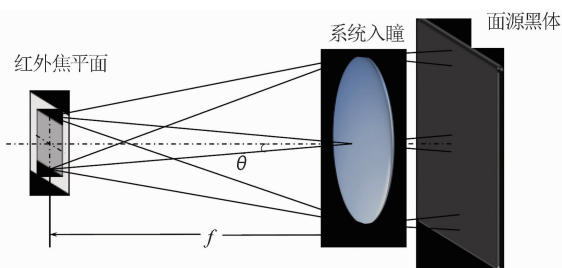


图 3 近距离面源黑体定标法的原理图

假设某系统的焦距为 f 、入瞳口径为 D , 则在探测器靶面 (i, j) 像素位置上接收到的辐射能为与入瞳大小相等的黑体辐射面在平行于该像元中心对应的主光线的辐射方向上, 辐射立体角等于该像元对应的立体角下的辐射通量。若主光线与光轴的夹角为 $\theta_{i,j}$, 则其对应的立体角 $\Omega_{i,j}$ 为^[11]

$$\Omega = \frac{A_d \cdot \cos\theta}{(f/\cos\theta)^2} = \frac{A_d \cos^3\theta}{f^2} \quad (1)$$

式中, A_d 为单个像元的面积。

每个像元所接收的辐射通量 Φ 可以表示为

$$\begin{aligned} \Phi(T) &= \tau_{opt} \cdot A_d \cdot \cos\theta \cdot \Omega \cdot L(T_b) \\ &= \frac{\tau_{opt} \cdot A_d \cdot \cos^4\theta}{f^2} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L(T_b) \\ &= k_1 \cdot L(T_b) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, τ_{opt} 为成像光学系统的透过率, T_b 为黑

体的辐射温度, $L(T_b)$ 对应黑体温度的辐射亮度。对于地基遥感大口徑红外特性测量系统来说, 其焦距长, 导致视场角小, 所以 $\cos^4\theta$ 取 1。因此 $k = \frac{\tau_{opt} \cdot A_d \cdot \cos^4\theta \cdot \pi \cdot D^2}{4f^2}$ 是一个与辐射温度或辐射亮度无关的量, 即

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

式中, $E(\lambda, T_b)$ 为辐射源发出的辐射照度。制冷型红外辐射特性系统输出的灰度值与辐射源发出的辐射通量成正比。由式(3)可得到定标源发出的辐射亮度与系统输出的响应值(单位为 DN)之间的关系:

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

式中, $G_{i,j}$ 为红外辐射测量系统的响应灰度, $R_{i,j}$ 为系统的增益, $B_{i,j}$ 为系统的偏置(单位为 DN)^[12-14]。

2 变 F 数系统的辐射定标模型

前面讲过辐射定标一般采用标准面源黑体。面源黑体主要模拟高温目标。这种定标方式主要用于高温被测目标, 其测量对应目标的自身辐射特性测量。定标场景如图 4 所示。

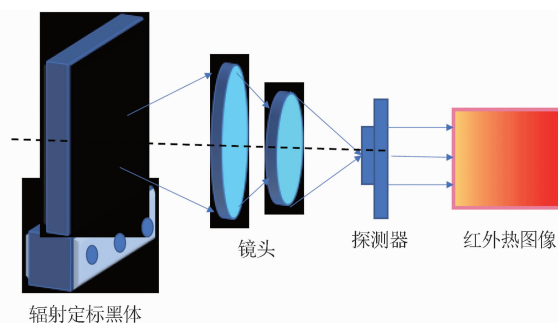


图 4 辐射定标场景

为了获取短波变 F 数系统辐射定标的定量关系, 下面介绍其模型推导过程。在理想情况下, 经光学镜头入射到红外探测器(见图 5)的光子数为 N_p , 由入射光子所激发的电子数为 N_e , 则该红外探测器的光电转化效率 $\eta(\lambda)$ 可表述为

$$\eta(\lambda) = \frac{N_e}{N_p} \quad (5)$$

若在入瞳直径为 D 的光学系统上接收能

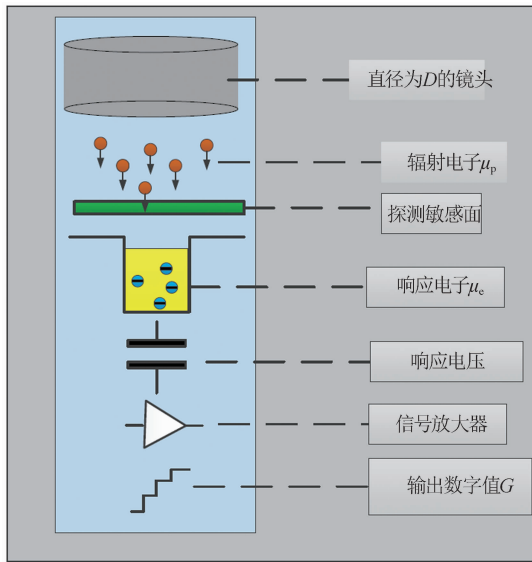


图 5 制冷型红外探测器的工作原理

量，则在曝光时间 T_{int} 内，到达入瞳面的目标辐射出射度 M 为

$$M(\lambda, T) = \frac{h \cdot \nu \cdot N_p}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \cos\theta \cdot T_{int}} = \frac{h \cdot c \cdot N_e}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot T_{int} \cdot \cos\theta \cdot \lambda \cdot \eta(\lambda)} \quad (6)$$

经过光学系统到达探测器，

$$M(\lambda, T) = \tau_{opt} \cdot \Omega \cdot L(\lambda, T_b) = \frac{\tau_{opt} \cdot A_d \cdot \cos^3\theta}{f^2} \cdot L(\lambda, T_b) \quad (7)$$

对式(7)进行处理，则

$$N_e(\lambda) = \frac{\tau_{opt} \cdot A_d \cdot T_{int} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot \eta(\lambda)}{4F^2 \hbar c} \cdot L(\lambda, T_b) \quad (8)$$

在探测器波段范围内对式(8)进行积分：

$$N_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{opt} \cdot A_d \cdot T_{int} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot \eta(\lambda)}{4F^2 \hbar c} \cdot L(\lambda, T_b) d\lambda \quad (9)$$

经线性放大后的信号 G 为

$$G = \frac{a \cdot A_d \cdot T_{int} \cdot \lambda \cdot \pi}{4F^2 \hbar c} \quad (10)$$

$$\times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{opt} \cdot \lambda \cdot \pi \cdot \eta(\lambda) \cdot L(\lambda, T_b) d\lambda$$

若定标增益系数为 k ：

$$k = \frac{a \cdot A_d \cdot T_{int} \cdot \lambda \cdot \pi}{4F^2 \hbar c} \quad (11)$$

可以看出，系统定标响应增益与系统的 F 数有直接的关系。系统的 F 数越小，则其响应能力

减弱。

2 实验数据处理

2.1 辐射定标数据分析

为验证推导模型的正确性，试验采用口径为 1000 mm 的短波红外辐射测量系统对不同焦距 (F 数) 下的定标数据进行分析。表 1 列出了所用系统的具体指标。

表 1 红外辐射测量系统的参数

参数名称	数值
系统口径	1000 mm
波段	0.9 μm ~1.7 μm
像元数	640×512
像元大小	20 μm
位深	16

辐射定标采用 1100 mm×1100 mm 的面源黑体。该标准辐射源的有效辐射面在近距离定标时可以覆盖系统的光瞳和视场角。系统的定标场景如图 6 所示。辐射测量系统采集不同曝光时间 (6 ms、8 ms 和 10 ms) 的图像，通过拟合得到短波红外辐射测量系统在不同积分时间下的定标结果 (见图 7)。结果显示，系统在各个积分时间下都具有良好的线性度，其在 8 ms 积分时间下的辐射定标均方根误差为 5.08%。可以看出，中低温下对短波系统进行辐射定标仍存在较大的误差。通过进一步对整个系统的靶面进行分析，得到系统在各个积分时间下的定标方程 (见表 2)。

表 2 不同积分时间下的定标方程

波段	t/ms	定标方程
短波	6	$y=24193.30x+19959.81$
	8	$y=31707.90x+19968.69$
	10	$y=39710.54x+19965.13$

图 9 所示为整个靶面的成像均匀度效果。可以看出，原始图像虽然具有良好的均匀度，但仍有电子读出噪声。为提高系统的均匀度，可采用两点校正来提高目标提取精度。从图 10 中可以看出，整个光学系统像质控制良好，探测坏点较少，具有良好的响应均匀度。图像校正后具有良好的成像效果。

短波主光学系统 标准辐射定标黑体



图 6 辐射定标现场

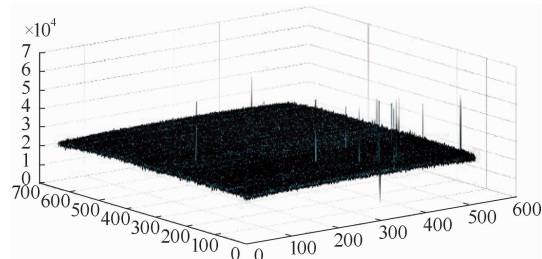


图 9 原始图像

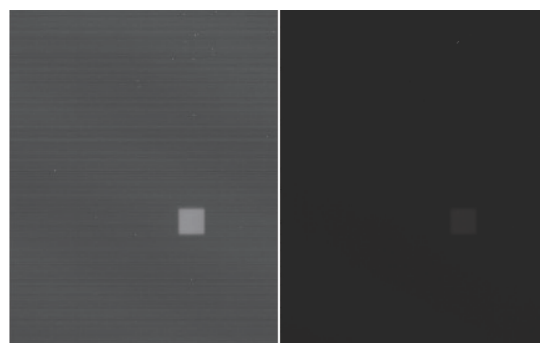


图 10 定标图像均匀性

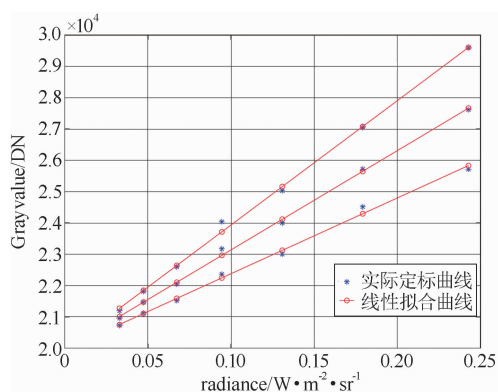


图 7 辐射定标结果

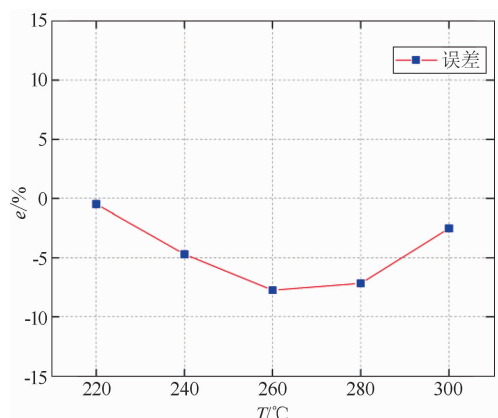


图 8 辐射定标误差

表 3 理论设计 F 数结果

焦距/mm	入瞳直径/mm	F 数
2000	600	3.3
4000	800	5
8000	1000	8

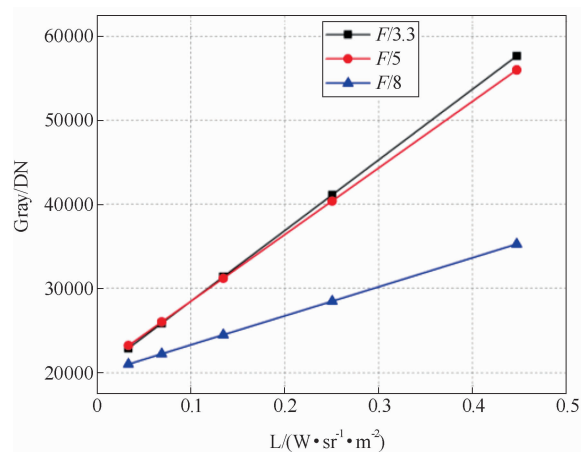


图 11 不同 F 数下的定标结果

表 4 不同 F 数下的定标方程

焦距/mm	定标方程	F 数
2000	$y=84156.00x+20047.14$	3.3
4000	$y=79333.68x+20534.95$	5
8000	$y=34568.02x+19827.98$	8

2.2 不同 F 数的结果分析

表 3 列出了短波连续变焦系统的理论设计 F 数。不同焦距下具有不同的 F 数。为提高目标的观测效果,短焦时采用小 F 数,可以提高接收能量的数量。大 F 数可以提高目标的分辨率。

因此对不同焦距下的辐射进行定标拟合。图 11 所示为不同 F 数下的定标结果。

从表 4 中可以看出,随着 F 数的增大,定标增益系数逐渐变小。这证实了上述理论推导

的正确性。另外，在长焦情况下，目标越大，越能看清细节。但是目标的能量削弱，对红外辐射测量来说，效果不一定更准确。因此选用小 F 数具有更好的效果。

3 结论

本文对短波变 F 数系统的红外辐射定标规律进行了初步探究，推导了不同 F 数下的定标系数变化规律，并基于 1000 mm 口径的短波红外系统对上述推导过程进行了验证，证实了上述推导过程的正确性。该推导结果对变 F 数红外辐射定标规律具有指导意义，并且对后续变焦系统的定标具有一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 陈洪钧, 周航宇. InGaAs 可见/短波红外焦平面探测器新进展 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(4): 431-434.
- [2] 黄杨程. 空间遥感用 InGaAs 短波红外探测器 [J]. *红外*, 2004, **25**(3): 10-18.
- [3] 姜伟, 黄巧林. 航天光学遥感 InGaAs 短波红外成像应用技术 [C]. 北京: 第二十三届全国空间探测学术交流会, 2010.
- [4] 吴世辉, 尹达一, 吴军, 等. 短波 InGaAs 红外面阵视频成像系统技术研究 [J]. *激光与红外*, 2012, **42**(12): 1355-1360.
- [5] 龚海梅, 张可锋, 唐恒敬, 等. InGaAs 近红外阵列焦面阵的研制进展 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(1): 14-18.
- [6] 李雪, 邵秀梅, 李淘, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(1): 64-71.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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**: 151-169.
- [13] 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.
- [14] 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.