

文章编号: 1672-8785(2018)06-0015-06

基于长波红外成像系统的红外 辐射特性测量方法

李保霖¹ 蔡立华^{2*} 张 涛² 李 周^{2,3}

(1. 海军驻长春地区航空军事代表室, 吉林 长春 130033;

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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 地基红外成像系统是靶场领域实现目标跟踪、实况记录成像的重要成像设备之一。配有高性能红外辐射定标系统的地基长波红外成像系统, 可对低温以及常温目标实现高精度辐射特性测量。通过建立制冷型红外辐射特性测量系统的辐射测量模型, 在 7.7~9.3 μm 长波波段利用某光学口径为 600 mm 的长波红外辐射测量系统实现了对目标的高精度测量。实验结果表明, 辐射测量的精度为 16.81%, 能满足靶场对高精度辐射测量的要求。

关键词: 红外成像系统; 辐射特性测量; 长波; 辐射反演

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.06.003

Infrared Radiation Characteristics Measurement Based on Long Wave Infrared Imaging System

LI Bao-lin¹, CAI Li-hua^{2*}, ZHANG Tao², LI Zhou^{2,3}

(1. Navy Stationed in Changchun Regional Aviation Military Representative Office, Changchun 130033, China;

2. Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The ground-based infrared imaging system is one of the important imaging devices for target tracking and recording in real time. The ground-based long-wave infrared imaging system equipped with a high-performance infrared radiation calibration system can realize high-precision radiation characteristics measurement at room temperature. By establishing the model of a cooling infrared radiation characteristic measurement system, high-precision measurement of a target is implemented by a long-wave infrared radiation measurement system in the long-wave band from 7.7 μm to 9.3 μm . The experimental results show that the radiation measurement accuracy is 16.81 percent. It can meet the high-precision radiation measurement requirements of a shooting range.

Key words: infrared imaging system; measurement of radiation characteristics; long wave; radiation inversion

收稿日期: 2018-04-01

作者简介: 李保霖(1985-), 男, 吉林长春人, 本科, 主要从事光电工程与测量技术研究。

E-mail: 15948785786@163.com

0 引言

地基红外辐射特性测量系统即地基红外经纬仪是现代化、信息化靶场对空间飞行目标进行精密跟踪、准确测量必不可少的光电测量设备。高精度红外辐射测量系统对目标辐射特性测量、光学靶场精细量化研究具有重要的意义。

自上世纪起, 欧美等军事强国先后建立了涵盖从紫外($0.4 \mu\text{m} > \lambda > 0.01 \mu\text{m}$)到长波红外($1000 \mu\text{m} > \lambda > 1 \mu\text{m}$)的宽波段辐射特性测量系统, 纵向涵盖地基、空基(机载、球载)和在轨天基(星载)辐射特性测量系统。目前已经完成了辐射特性测量系统的构建, 开始深入研究并完善数据库, 提高测量精度^[3]。

在天基红外辐射测量方面, 美国从 20 世纪 70 年代便发射了多颗载有红外辐射测量系统的测量侦察卫星。^[4] 其中, 影响力较大的包括 20 世纪末期的 Delata、IBSS、MSTI 和 LACE 计划以及近年的 NFIRE 测量卫星试验。美国早在 2006 年便已经部署天基红外导弹预警系统, 以其作为预警反导技术的一部分。该系统配备短波和中波红外热成像系统, 可对洲际弹道导弹和战略导弹的尾焰辐射进行侦测, 能提供非成像红外数据并预警导弹落区。^[5]

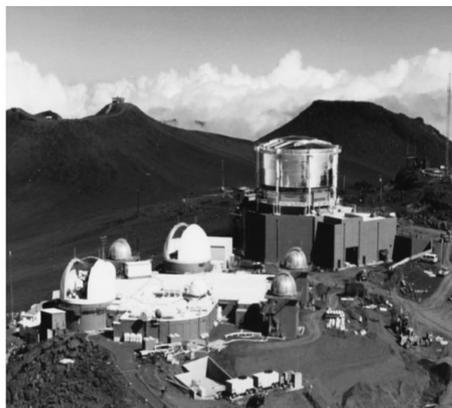


图 1 毛伊岛的光学基站布局

在地基靶场实验方面, 最具代表性的当属美国毛伊岛的 1.23 m 口径的地基红外辐射测量系统。该系统的红外辐射测量误差小于 10%, 可对空间目标实现高精度高红外辐射特性测量。该系统设计了卡塞格林式光路, 主光

学系统多光合一, 主要利用短波、中波、长波红外图像反演, 得到各波段的辐射特性, 获得高帧频的多谱段目标图像。其基站布局如图 1 所示。^[6]

1 红外辐射特性测量的数学模型

在实际外场环境进行目标的红外辐射特性测量时, 红外辐射特性测量系统能接收到的有效辐射亮度包括三个部分: 被测目标表面的自身辐射亮度 $L(T_0)$ 、目标对周围环境的反射辐射亮度 $L(T_b)$ 以及大气自身的辐射亮度 $L(T_{path})$ ^[7]。

对于不透明的被测目标, 其表面的辐射亮度可以表述为

$$\begin{aligned} L_1(T) &= \varepsilon \cdot L(T_0) + \rho \cdot L(T_e) \\ &= \varepsilon \cdot L(T_0) + (1 - \varepsilon) \cdot L(T_e) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ε 为目标在相应红外波段的平均发射率; ρ 为被测目标表面的平均反射率; 不透明辐射源满足 $\varepsilon = 1 - \rho$ 。

到达红外辐射特性测量系统入瞳的辐射亮度为

$$\begin{aligned} L_2(T) &= \tau_{atm} \cdot \varepsilon \cdot L(T_0) + \tau \cdot (1 - \varepsilon) \\ &\quad \times L(T_e) + L(T_{path}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, τ_{atm} 是测量路径上的大气在测量波段的平均透过率。

进入红外辐射特性测量系统并参与光电转化的辐射亮度为

$$\begin{aligned} L_3(T) &= \tau_{opt} \cdot (\tau_{atm} \cdot \varepsilon \cdot L(T_0) + \tau_{atm} \\ &\quad \times (1 - \varepsilon) \cdot L(T_e) + L(T_{path})) + L(T_{stray}) \end{aligned} \quad (3)$$

到达红外焦平面阵列的辐射亮度最终参与光电转化, 经过电路放大, 最终输出数字灰度。

外场测试时, 实际被测目标所发出的辐射能在到达红外辐射特性测量系统过程中都难免会因受到大气影响而衰减。由于大气自身也是辐射源, 其辐射能也会叠加到目标发出的辐射能中, 一起到达红外辐射特性测量系统。^[8] 因此, 实际目标的辐射特性测量模型可以表述为

$$G = R_1 \cdot [\tau_{opt} \cdot (\tau_{atm} \cdot \varepsilon \cdot L(T_0) + \tau_{atm}$$

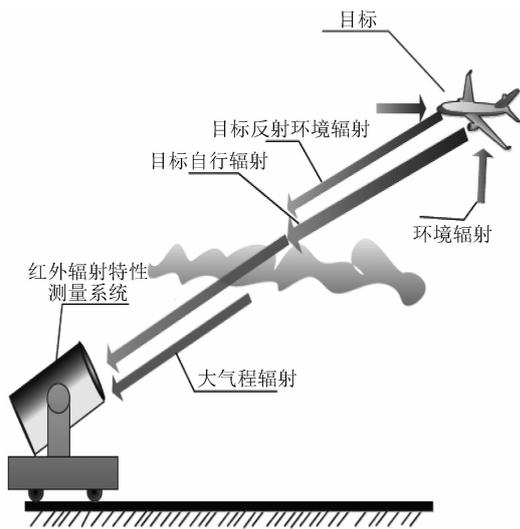


图 2 红外辐射特性的测量原理

$$\times (1-\epsilon) \cdot L(T_e) + L(T_{parh}) + L(T_{out})] + B_m \quad (4)$$

式中, G 为红外辐射特性测量系统的数字灰度输出值(无量纲, 一般以灰度级表示), R_1 为红外焦平面阵列的响应率(单位为 $1/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$), B_m 为红外焦平面阵列暗电流引起的数字灰度输出值(无量纲, 以灰度级表示)。将式(4)改写为

$$G = \tau_{atm} \cdot [R \cdot \epsilon \cdot L(T_0) + R \cdot (1-\epsilon) \times L(T_e)] + R \cdot L(T_{parh}) + B \quad (5)$$

式中, $R = R_1 \cdot \tau_{opt}$ 为整个红外辐射特性测量系统的响应率, $B = B_m + R \cdot L(T_{out})$ 为整个红外辐射测量系统的响应偏置。 $L(T_0)$ 为目标辐亮度(单位为 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$), 参数 τ_{atm} 、 $L(T_{parh})$ 分别为目标与红外测量系统之间的大气透过率和程辐射。

由式(5)可反演得到被测目标的辐射亮度:

$$L(T_0) = \frac{G - B - R \cdot L(T_{parh})}{\tau_{atm}} - \frac{R \cdot (1-\epsilon) \cdot L(T_e)}{R \cdot \epsilon} \quad (6)$$

整个红外辐射特性测量系统的响应率 R 和响应偏置 B 可由红外辐射定标子系统给出。具体原理在下文中表述。被测目标与红外辐射

测量系统之间的大气平均透过率 τ 和测量路径上的程辐射 $L(T_{parh})$ 可以由大气传输修正系统测得。若 ϵ 为目标材料或者涂层属性材料的发射率, 可准确获得目标的辐射亮度特性。将各个子系统获得的测量参数代入式(6), 便可反演得到目标表面的辐射亮度、温度等特性。

2 红外辐射测量系统的辐射定标原理

由上文可知, 完成红外辐射特性的测量必须对红外辐射测量系统进行定标。近距离标准扩展源定标法是当前地基靶场领域最常见的定标方法之一, 它主要利用发射率高、均匀性好的面源黑体作为标准扩展定标源, 将面源黑体置于红外辐射测量系统的入瞳处, 使得面源黑体的有效辐射面完全覆盖系统的入瞳, 其具体的定标原理如图 3 所示^[9-11]。

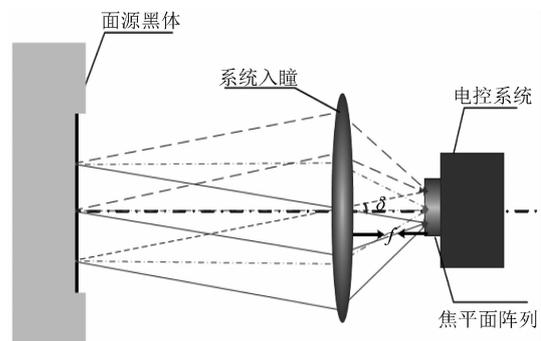


图 3 外置扩展源定标的原理图

假设辐射源的主光线与系统主光轴的夹角为 θ , 且理想红外焦平面上每个像素的大小相等, 记为 A , 则每个像元对应的辐射成像立体角 Ω 为

$$\Omega = \frac{A \cdot \cos\theta}{(f/\cos\theta)^2} = \frac{A \cdot \cos^3\theta}{f^2} \quad (7)$$

若系统入瞳直径尺寸为 D , 整个光学系统的焦距 f 已知, 则对应红外焦平面 (i, j) 处像元的辐射照度 E 为在单位立体角内与红外辐射测量系统入瞳面积相等且平行于主光线辐射方向的照度。每个像元所接收的辐射照度可以表示为

$$E(T) = \tau_{opt} \cdot \cos\theta \cdot \Omega \cdot L(T_b) = \frac{\tau_{opt} \cdot A \cdot \cos^4\theta}{f^2} \cdot L(T_b) \quad (8)$$

式中, τ_{opt} 为红外辐射测量系统的光学系统在响应波段范围内的平均透过率, T_b 为面源黑体的温度。对于地基红外辐射测量系统, 其视场角一般较小, 即 $\cos^4 \theta$ 可以近似为 1。因此, $k = \frac{A \cdot \cos^4 \theta}{f^2}$ 与标准辐射定标源的温度无关, 即

$$E(T) = k \cdot L(T_b) \quad (9)$$

由式(9)可推导出红外辐射特性测量系统的辐射出射度与辐射亮度的线性关系, 即数字灰度值 G (单位为 DN) 与辐射亮度 $L(T_b)$ 的关系:

$$G = R \cdot L(T_b) + B \quad (10)$$

式(10)便是红外辐射测量系统辐射定标的理论依据。

3 大气传输修正

地基红外辐射测量系统在对空间目标观测时常受到大气环境的影响。而大气的衰减与散射、大气自身的红外辐射等因素会严重制约地基红外辐射测量系统的测量精度。因此, 必须在观测路径上对大气进行传输修正。

MODTRAN 软件是由美国空军物理实验室(The Air Force Research Lab, AFRL)和光谱科技公司(Spectral Sciences, SS)联合开发的一种针对中等光谱分辨率的大气透过率及辐射传输算法的分析软件, 目前已成为较主流的大气传输率与辐射率计算软件。^[12] 利用 MODTRAN 软件可以比较准确地计算大气传输透过率和大气程辐射。例如, 计算海拔为 1300 m、水平方向 1000 m 的观测点的中纬度春季大气模型, 取 7.7~9.3 μm 波段范围进行分析。图 4 给出了整个波段范围内不同波长的大气传输透过率。分析发现, 在不同波长情况下, 传输过程中大气的衰减倍率存在较大差异。

除此之外, 在对目标进行观测时, 观测路径上大气自身的热辐射会叠加到被观测目标的辐射中。大气在不同波长所发出的自发辐射亮度也是不同的。因此, 需要在观测波段进行详细分析。图 5 给出了在 7.7~9.3 μm 长波范围

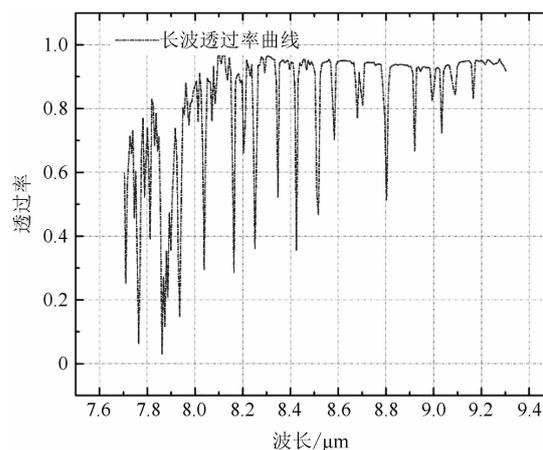


图 4 中纬度春季大气的整体透过率

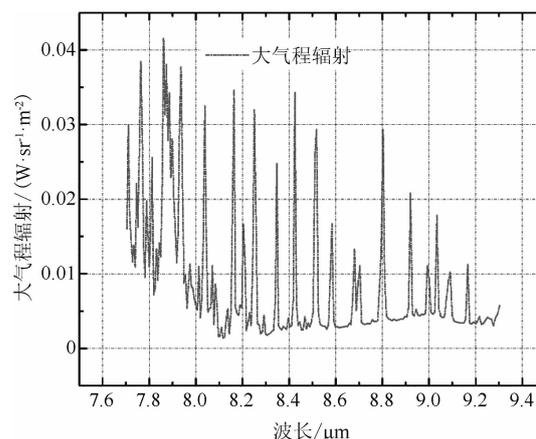


图 5 大气程辐射与波长的关系

内大气程辐射随波长的变化关系。

4 红外辐射测量实验

为验证长波红外辐射测量系统对被测目标的辐射测量精度, 在外场条件下进行辐射定标和辐射测量实验。实验的定标装置如图 6 所示。

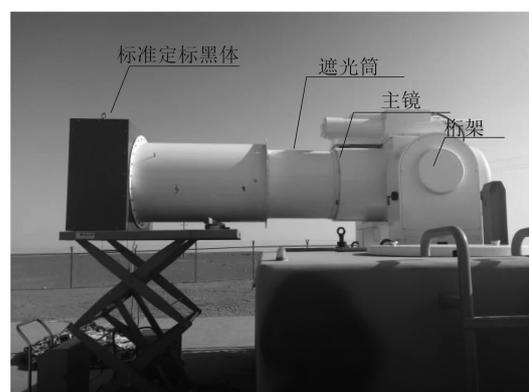


图 6 辐射定标现场

通常情况下, 长波对常温目标(温度范围为 30℃~100℃)具有良好的探测效果, 因此我们利用长波进行辐射测量。根据上述分析可知, 辐射定标是辐射测量的基础, 定标时选择温度范围为 50~100℃, 温度间隔为 10℃。其定标曲线如图 7 所示。数据曲线显示, 红外辐射测量系统在长波波段具有良好的线性度。

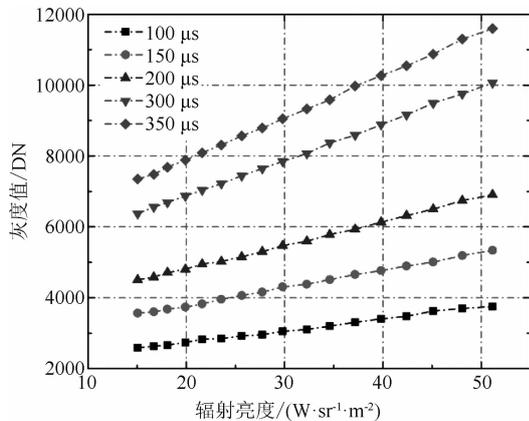


图 7 长波定标曲线

不同积分时间的定标方程见表 1。

表 1 不同积分时间的定标曲线结果

100 μs	$y=33.8529 * x+2068.6881$
150 μs	$y=50.8979 * x+2759.0533$
200 μs	$y=67.8733 * x+3454.0451$
300 μs	$y=101.9605 * x+4839.4678$
350 μs	$y=118.9989 * x+5533.0711$

要实现精确的目标红外测量, 必须实现大气传输修正。根据表 2 的气象以及观测数据, 利用 MODTRAN 软件计算得到测量时的大气透过率和大气程辐射数据, 结果见表 3。

表 2 测量实验的气象与观测参数

参数名称	数值
温度	15 ℃
湿度	20%
压强	856 hPa
距离	1000 m
能见度	23 km
观测仰角	0°
观测高度	1367 m

表 3 实验中大气透过率与大气程辐射的结果

大气透过率	大气程辐射 /W·sr ⁻¹ ·m ⁻²
0.8259	1.7558

表 4 辐射测量反演结果

积分时 间/μs	温度 /℃	标准辐 射亮度 L/(W·m ⁻² ·sr ⁻¹)	辐射反演的 辐射亮度 L/(W·m ⁻² ·sr ⁻¹)
200	50	25.5328	21.3913
	60	29.8155	24.9773
	70	34.5060	28.9668
	80	39.6102	32.5241
	90	45.1280	36.8609
300	50	25.5328	22.3134
	60	29.8155	25.3786
	70	34.5060	28.6931
	80	39.6102	33.1247
	90	45.1280	37.1982
100	51.0599	41.5507	

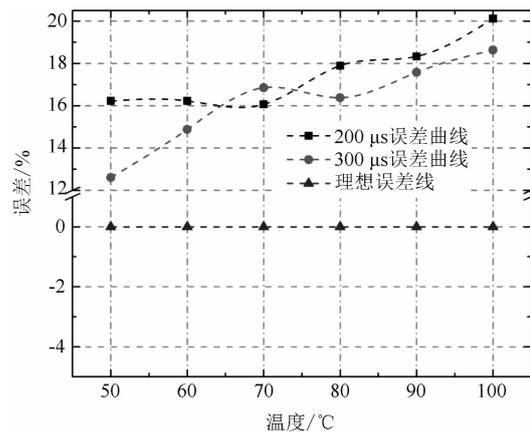


图 8 辐射反演的误差曲线

辐射测量图像如图 9 所示。实验结果显示, 随着温度升高, 虽然反演误差有增大趋势, 但是整个测量的平均误差只有 16.81%, 均方根误差为 1.93%。误差表现稳定, 能满足工程应用的 30% 精度测量要求。

5 结论

给出了地基红外靶场辐射特性测量的数学



图9 长波测量图像

模型，建立了 $7.7\sim 9.3\ \mu\text{m}$ 长波范围内红外辐射测量系统的定标模型，并在外场进行了辐射测量实验。实验过程中采用 MODTRAN 软件对大气衰减以及程辐射进行了修正。实验结果显示，目标辐射的测量精度低于 30%，结果能达到实际工程对红外辐射测量的要求，对今后长波常温目标的红外辐射测量工作具有指导意义。

参考文献

- [1] 宋怡然, 陈英硕, 蒋琪, 等. 国外典型巡飞弹发展动态与性能分析 [J]. 飞航导弹, 2013, 43(2): 37-40.
- [2] 张建生. 国外巡飞弹发展概述 [J]. 飞航导弹, 2015, 45(6): 19-26.
- [3] 李怀涛. 巡飞弹导引头及制导控制技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [4] 孙刚. 大视场红外搜索系统目标检测关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [5] 高庆嘉. 新型巡飞弹用红外成像制导系统关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [6] 张建奇. 光电成像系统建模及性能评估理论 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
- [7] 邹异松, 刘玉凤, 白廷柱. 光电成像原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- [8] 孙志远. 基于中波红外探测器的常温目标测温实验研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [9] 李满良, 胡小春, 甄小龙, 等. 外场辐射标定方法研究 [J]. 遥测遥控, 2014, 35(6): 61-66.
- [10] 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.
- [11] 袁邦洵. 大口径红外探测器红外定标 [D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [12] 毛峡, 胡海勇, 黄康, 等. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 1228-1231.