文章编号 2095-1531(2018)05-0804-08

基于红外辐射特性系统实现对面目标测量

乔铁英[1],蔡立华[2],李 宁[2],李 周[2,3*],李成浩[2,3]
(1. 92853 部队,辽宁 葫芦岛 125106;
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:地基红外经纬仪是测量空间军事和科学目标红外数据的重要手段之一。随着现代武器技术在隐身上方面的快速发展,面源体测量越显重要,而辐射亮度是面源红外作战的关键性指标。因此研究可靠的面积分析方法和辐射亮度计算方法对测试航空目标的隐身性能以及研制面源红外假目标具有重要的意义。本文提出一种简单可靠的面目标的提取方法,并利用该面源提取方法在某 ϕ600 mm 口径的红外经纬仪上进行辐射测量,测量数据经大气修正后将与标准亮度值进行比较。实验结果表明,利用本文提出的方法反演的辐射亮度的最大误差为 11.38%,均方根误差为 7.36%。

关 键 词:红外辐射测量系统;辐射定标;面源目标;温度反演

中图分类号:TN216 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20181105.0804

Opposite target measurement based on infrared radiation characteristic system

QIAO Tie-ying[1], CAI Li-hua[2], LI Ning[2], LI Zhou[2,3*], LI Cheng-hao[2,3]
(1. *No.* 92853 *Troops*, *Huludao* 125106, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics*, *Fine Mechanics and physics*,
Chinese Academy of Sciences, *Changchun* 130033, *China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: 15500027661@163.*com*

Abstract: The ground-based infrared theodolite is one of the most important means of measuring infrared data of military and scientific targets in space. With the rapid development of modern weapons technology in stealth, the measurement of surface target is becoming more and more important and the radiation brightness is a key indicator of surface type infrared combat. Therefore, it is of great significance to study area analysis method and radiance calculation method to test the stealth performance of the aviation target and to develop surface type infrared false target. In this paper, a simple and reliable method for extracting surface targets is

收稿日期:2017-12-25;**修订日期**:2018-02-12
基金项目:国家自然科学基金项目(No. 5167506)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 5167506)

proposed. By this method, radiation measurement is performed on a 600 mm aperture infrared theodolite. The measured data is compared with the standard brightness value after atmospheric correction. The experimental results show that the maximum error of the radiance inversion is 11.38% and the root mean square error is 7.36%. The experimental results show the effectiveness and reliability of the measurement method.

Key words: infrared radiation measurement system; radiation calibration; surface type target; temperature inversion

1 引　言

随着红外技术的快速崛起，红外辐射特性测量得到越来越广泛的应用。靶场红外目标辐射特性测量是探测目标、获取目标表面温度分布和评价目标隐身效果的基础技术之一[1]。而地基红外辐射特性测量系统，即红外经纬仪是现代化、信息化靶场对航空、航天目标进行跟踪、测量必不可少的光电测量设备[2]。

在光学测量领域，通常会将被观测的目标分为扩展源目标和点源目标。所谓点源一般是指在探测器上几何成像面积小于一个像元的目标，但是在实际测量中，理想的点源目标是几乎不存在的，某些成像形状单一，但面积大于一个像元的目标如果作为面目标处理会有很大的误差，而作为点源目标处理能得到有很好的结果。工程上通常将成像小于 10×10 像元数的目标作为点源目标。扩展源又称为面目标，其几何成像面积大于一个像元。一般情况下，如果目标在靶面上的成像大于 10×10，将其作为面目标处理。对于红外靶场测量一般会将近距离的导弹、火箭以及低空飞行的飞机看成面目标。辐射学上，扩展源目标的辐射量通常用辐射亮度表示，辐射亮度既包括辐射源的位置信息又包括国辐射源的方向特征信息。面目标的辐射测量是红外辐射特性测量的重要组成部分，有着重要的应用前景[3]。

学者们在辐射特性测量领域取得许多成就。李云红等人研究了定标与测量条件相同时的精确测温技术；杨词银、李宁等人研究了地基大口径辐射测量系统的定标测量[1-4]；孙志远，常松涛等人提出宽动态范围的定标以及点目标测量方法[5-7]。然而，目前可查阅的文章中，大部分是针对点目标的测量，面目标由于情况复杂，具有各异性，对其研究相对滞后，通常还是利用图像的阈值法对目标进行选取。

针对当前靶场测量领域对红外辐射测量所提出的新的测量要求，采用宽动态范围下的定标模型，利用大面源均匀黑体定标法对全口径红外辐射测量系统进行定标。在测量面目标时，通过一系列的推导得到面目标的辐射亮度结果，进而提出了一种面目标测量方法，并在口径为 600 mm 的红外辐射测量系统上进行了验证。

2 红外辐射定标测量原理

2.1 辐射特性测量系统的定标原理

系统定标是测试红外辐射测量系统性能的重要指标，决定着红外辐射测量系统在测量过程的可靠性及有效性。靶场红外辐射定标的基本原理是利用已知黑体作为辐射源，得到不同辐射照明时系统的输出信号，从而建立系统入瞳辐射量与系统输出量之间的关系，一般来说红外辐射测量系统的定标要求不确定度在 10% 以内。

目前地基靶场的红外辐射测量系统的标定方法包括均匀大面源黑体定标法和成像定标法。其中成像标定法又以平行光管法最为常见。

2.1.1 平行光管定标法

作为成像定标法的典型代表，平行光管定标法是利用红外平行光管对出射面积小的红外辐射源进行扩束，辐射源一般采用中、高温的腔型黑体，出射光经平行光管扩束后，将均匀光束投射到红外辐射测量系统入瞳上进行定标[6-7]。原理如图 1 所示。高温腔型黑体与大口径平行光管组

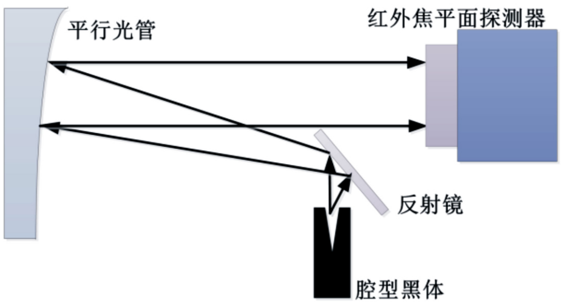


图1 平行光管定标法原理示意图

Fig. 1 Schematic of the collimator calibration

合，可实现对红外辐射测量系统高温段的定标，一定程度上弥补了均匀大面源黑体不能做到高温定标的缺陷。但是平行光管法存在着大口径平行光管制造成本高，周期长、机动性差等缺点，故只能作为室内定标方法[8]。

2.1.2 均匀大面源黑体定标法

均匀大面源黑体法的基本原理是在辐射特性测量系统的入瞳处放置均匀的大面源黑体。面源黑体的有效面积要完全覆盖辐射特性测量系统的入瞳。黑体可视为标准朗伯体，对辐射特性测量系统进行临界照明[9]。原理如图2所示。均匀大面源黑体定标法可以有效消除外界环境的影响且定标精度高，其可以实现对所有像元的定标，且没有透过率的影响，定标过程更为直观。

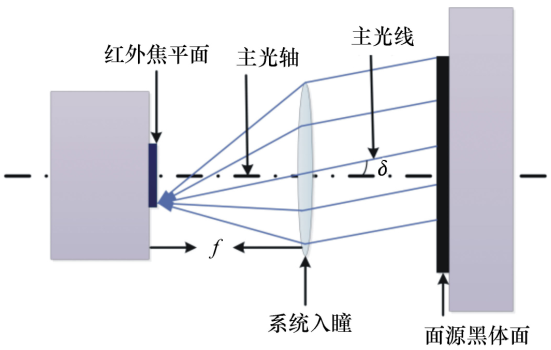


图2 均匀大面源黑体法定标原理图

Fig. 2 Calibration schematic of uniform large surface source blackbody

当主光线与光轴夹角为 δ 时，单个像元的立体角 Ω 可以表示为:

$$\Omega = \frac{S \cdot \cos\delta}{(f/\cos\delta)^2} = \frac{S \cdot \cos^3\delta}{f^2}, \quad (1)$$

其中，S 为单个像素面积，f 为光学系统的焦距。

面源黑体入射到该像元的辐射通量 ϕ:

$$\Phi = L(T_b) \cdot dS \cdot \cos\delta \cdot d\Omega = \frac{\pi \cdot L(T_b) \cdot S \cdot \tau_{opt} \cdot \cos^4\delta}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2, \quad (2)$$

式中，T_b 为黑体温度；τ_{opt} 为光学系统的透过率；D/f 为光学系统的相对孔径；$L(T_b)$ 为黑体输入的辐射亮度，具体表述为:

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

式中，ε 为黑体的发射率，$\lambda_1 \sim \lambda_2$ 是探测器响应波段范围，$W(\lambda, T_t)$ 为光谱出射度。

本文为了提高定标精度和定标效率，将采用均匀大面源黑体法定标。

2.1.3 考虑积分时间定标方程

在靶场测量设备上，制冷型红外焦平面阵列通常作为成像探测器，其灰度响应与辐射亮度满足[10]:

$$G_{i,j} = R_{i,j} \times L(T_b) + G'_{i,j}, \quad (4)$$

式中，$G_{i,j}$ 为探测器的灰度输出，$R_{i,j}$ 为系统对输入辐射亮度的响应率。$G'_{i,j}$ 为没有辐射亮度输入时的初始偏置响应，可以表达成:

$$G'_{i,j} = G_{i,j}^{stray} + G_{i,j}^{dark}, \quad (5)$$

$G_{i,j}^{stray}$ 为由外部杂散辐射引起的灰度响应。外部杂散辐射可以被定量表述为 $G_{i,j}^{stray} = R_{i,j} \cdot L^{stray}$，其中 L^{stray} 为红外系统外部因素引起的杂散辐射亮度；$G_{i,j}^{dark}$ 为探测器自身暗电流等内部因素引起的灰度响应[11]。

在线性响应范围内，探测器的积分时间与系统的输出灰度成正比:

$$G'_{i,j} = t \cdot G_{i,j}^{stray} + G_{i,j}^{dark}, \quad (6)$$

对红外辐射测量系统来说，一般需设置多个积分时间档位，则积分时间的定标方程[12]:

$$G_{i,j} = t \cdot [R_{i,j} \cdot L(T_b) + G_{i,j}^{stray}] + G_{i,j}^{dark}. \quad (7)$$

2.2 辐射特性测量系统的测量原理

地基红外经纬仪焦平面阵列上接收能量的主要来源包括[13]：光学系统与目标之间大气自身辐

射的辐射量 L_{path}; 目标辐射能经大气衰减的辐射量 $\varepsilon_o \cdot \tau_{atm} \cdot L(T_o)$; 目标对周围环境的反射经大气衰减的辐射能 $(1-\varepsilon_o) \cdot \tau_{atm} \cdot L(T_e)$。其中 ε_o 为目标发射率, τ_{atm} 为大气透过率, T_o 为目标表面温度, T_e 为环境温度。如图 3 所示。

探测器上各个像元灰度值可以表示为[14]:

$$G_{i,j} = \varepsilon_o \cdot \tau_{atm} \cdot R_{i,j} \cdot L_{i,j}(T_o) + (1-\varepsilon_o) \cdot \tau_{atm} \cdot R_{i,j} \cdot L(T_e) + R_{i,j} \cdot L_{path} + G'_{i,j}, \tag{8}$$

$R_{i,j}$ 和 $G'_{i,j}$ 分别为相同积分时间下通过系统定标得到的响应率和初始偏置。

根据式(3),反演目标辐射亮度:

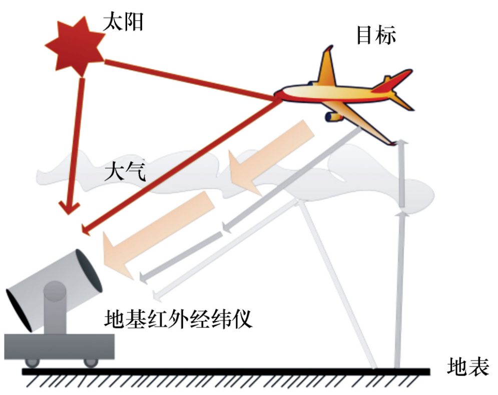


图 3　地基红外系统辐射特性测量示意图

Fig. 3　Schematic of radiation characteristics measurement for base-ground infrared system

$$L_{i,j}(T_o) = \frac{G_{i,j} - G'_{i,j} - (1-\varepsilon_o) \cdot \tau_{atm} \cdot R_{i,j} \cdot L(T_e) - R_{i,j} \cdot L_{path}}{\varepsilon_o \cdot \tau_{atm} \cdot R_{i,j}}. \tag{9}$$

$R_{i,j}$ 和 $G'_{i,j}$ 可通过均匀大面源黑体定标或者平行光管定标法计算得到, ε_o 和 T_e 通过测量得到, τ_{atm} 和 L_{path} 可由 MODTRAN 等大气传输计算软件获得。由式(9)可得到被测目标的辐射亮度,如果获得目标表面的发射率分布情况,也可以计算目标表面的温度分布,完成目标的辐射特性测量,对于红外辐射测量系统来说,外场测量误差一般要求在 30% 之内[15]。

2.3　面目标辐射特性测量

面源目标辐射特性测量原理图如图 4 所示。假设目标的理想成像尺寸为 A_i,则目标成像物象关系:

$$A_i = M^2 \cdot A_t = \frac{f^2}{R_1^2} \cdot A_t, \tag{10}$$

式中, M 为系统放大率, A_t 为目标在像方的投影面积,可由姿态信息和目标尺寸解算得到, f 为辐射测量系统的焦距, R_1 为物距。

选取包含整个目标弥散斑和少部分背景的区域 A_1,称为"目标区域",区域内共有 N_1 个像元,其中包含所有含有目标成像能量的像元和一部分背景成像像元,即目标成像的所有能量在 A_1 内。A_2 区域含有 N_2 个像元,范围包含 A_1。A_1 和 A_2 之间的区域只包含背景,称为"背景区域",像元数为 N_2-N_1, A_d 为单个像元尺寸,则背景区域的面积为 $(N_2-N_1) \cdot A_d$,那么背景灰度值均值为:

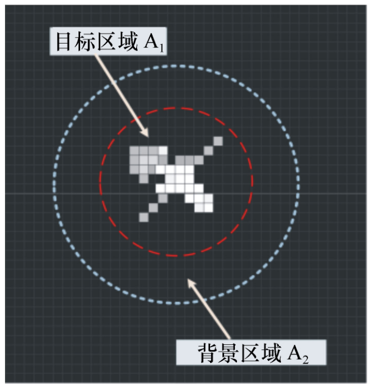


图 4　面源目标辐射特性测量原理图

Fig. 4　Schematic of radiation characteristic measurement for surface target

$$G_b = \frac{\sum_{i=1}^{N_2-N_1} G_i}{N_2 - N_1}, \tag{11}$$

其中, $G_i, i=1,2,\cdots,N_2-N_1$ 为背景区域像元灰度值。

而 A_1 区域内所有像元的灰度值之和为:

$$G_{sum} = \sum_{i=1}^{N_1} G_i, \tag{12}$$

其中,背景辐射的贡献为:

$$G_{sum,background} = \frac{(N_1 \cdot A_d - M^2 \cdot A_t)}{A_d} \cdot G_b. \tag{13}$$

目标辐射的贡献为:

$$G_{\mathrm{sum,target}} = \frac{M^2 \cdot A_{\mathrm{t}}}{A_{\mathrm{d}}} \cdot (\tau_{\mathrm{atm}} \cdot R_{i,j} \cdot L_t + R_{i,j} \cdot L_{\mathrm{path}} + G'_{i,j}) \quad . \tag{14}$$

而 A_1 区域内所有像元灰度值之和:

$$G_{\mathrm{sum}} = G_{\mathrm{sum,background}} + G_{\mathrm{sum,target}} , \tag{15}$$

得到:

$$\sum_{i=1}^{N_1} G_i = N_1 \cdot G_{\mathrm{b}} + \frac{M^2 \cdot A_{\mathrm{t}}}{A_{\mathrm{d}}} \cdot \tau_{\mathrm{atm}} \cdot R_{i,j} \cdot L_{i,j}(T) \quad , \tag{16}$$

因此,目标的辐射亮度为:

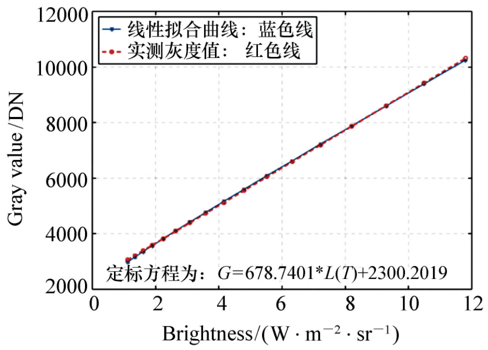
$$L_{i,j}(T) = \frac{\sum_{i=1}^{N_1} G_i - N_1 \cdot G_{\mathrm{b}}}{\tau_{\mathrm{atm}} \cdot R_{i,j} \cdot M^2 \cdot A_{\mathrm{t}}/A_{\mathrm{d}}} \quad . \tag{17}$$

3 外场辐射测量实验

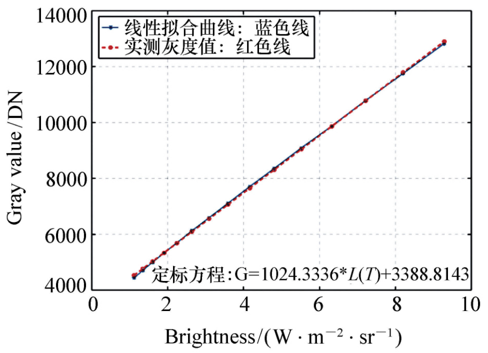
3.1 外场定标测量实验

为了验证本文提出的对面目标的测量方法,是否满足精度要求及其实际应用的可行性,在外场开展定标和目标辐射特性测量的验证性实验。靶场经纬仪红外望远镜系统参数如下:工作波段为 3.7 ~4.8 μm,靶面像元数目为 640 ×512,像元大小为 15 μm,输出位数为 14 位;主光学系统的口径为 600 mm,焦距为 1 200 mm;外场定标采用北京南奇星公司生产的大面源均匀黑体。均匀大面源黑体放置在红外系统前,黑体面充满红外辐射测量系统的入瞳,对红外辐射测量系统进行辐射定标。积分时间分别选取2 000 μs和3 000 μs,定标的温度为 20 ~100 ℃,以 5℃ 为温度间隔,以 20、40、60 和 80 ℃ 为定标曲线拟合点,其余温度点作为定标精度检测点,以验证红外辐射定标精度。定标结果在图 5 给出。

定标结果显示,在 2 000 μs 时,增益 R_{ij} = 678.374 01 和偏置 G'_{ij} =2 300.201 9,定标的最大误差为 2.06%,整个积分时间的定标误差即均方根误差为:1.38%;在 3 000 μs 时,增益 R_{ij} = 1 024.333 6和偏置 G'_{ij} =3 388.814 3,定标的最大误差为 2.01%,整个积分时间内的均方根误差为 1.39%。定标结果满足系统 10% 的指标要求。定标误差在表 1 中给出。



(a) 2000 μs



(b) 3000 μs

图 5 不同积分时间定标拟合曲线

Fig. 5 Calibrating fitting curves at different integration times

表 1 定标检测误差

Tab. 1 Error of calibration detection

黑体温度/℃	2 000 μs 误差/%	3 000 μs 误差/%
25	-2.06	-2.01
35	0.83	0.83
45	1.90	1.88
55	1.36	1.37
65	0.66	0.67
75	-0.31	-0.35
85	-1.04	-1.08
95	-1.85	-1.88
均方根误差	1.38	1.39

3.2 外场测量与结果

外场辐射测量实验采用以色列 CI 公司生产的 SR800-12HT 高精度的面源黑体对红外系统进行辐射测量。已知黑体的温度变化范围为 0 ~600 ℃,将其放置在距红外辐射测量系统大约 830 m的位置。经成像计算得知,目标在探测器

的成像的像元数为 30×30，符合面目标处理的要求。实验期间，环境条件：晴朗，微风；观测仰角为 0°；环境温度为 7.4 ℃；气压为 899 hPa；能见度为 30 km；湿度为 20%。利用 MODT5RAN 软件计算得到的中波大气透过率为 0.735 4；大气程辐射为 0.211 5 W·m^{-2}·sr^{-1}。

图 8　在 830 m 处获得中波红外图像

Fig. 8　Mid-wave infrared image of obtained at 830 m

为了验证本文所提方法对面源目标测量的有效性和可行性，在外场利用口径为 600 mm 的红外辐射测量系统采集数据，并利用相关算法进行后续处理，反演得到整个目标亮度的平均值。将得到的亮度与光谱修订的标准辐射亮度值进行比较，从而求得反演的辐射亮度误差。实验期间，红外辐射测量系统的中波相机的积分时间设定为 2000 μs 和 3 000 μs，温度采集范围为 50～110 ℃，采样温度步长为 10 ℃。

反演辐射亮度过程将采用均匀大面源黑体定标法计算得到的增益 $R_{i,j}$ 和偏置 $G'_{i,j}$，测量实验显示，当积分时间为 2 000 μs 时，其测量的最大误差为 11.38%，测量的最小误差只有 0.59%，在 2 000 μs 整个测量温度范围 50～110 ℃ 内的测量均方根误差为 6.64%，误差稳定；当积分时间为 3 000 μs 时，其测量的最大误差为 8.08%，测量的最小误差只有 0.36%，在 3 000 μs 整个测量温度范围 50～110 ℃ 内测量均方根误差为 4.66%，误差同样非常稳定。在外场两个不同积分时间的测量结果均低于 30%，证明本文提出的面目标测量方法有效且可靠。

表 2　面目标的测量结果

Tab. 2　Measurement results of surface target

积分时间/μs	温度/℃	标准辐射亮度/(W·m^{-2}·sr^{-1})	测量辐射亮度/(W·m^{-2}·sr^{-1})	测量误差/%
2000	50	3.084 6	3.335 2	8.12
	60	4.161 5	4.635 0	11.38
	70	5.520 9	5.969 9	8.13
	80	7.212 4	7.506 5	4.08
	90	9.289 8	9.344 4	0.59
	100	11.810 4	11.372 5	−3.71
	110	14.835 1	14.223 4	−4.12
3000	50	3.084 6	3.095 8	0.36
	60	4.161 5	4.352 6	4.59
	70	5.520 9	5.824 2	5.49
	80	7.212 4	7.277 4	0.90
	90	9.289 8	9.132 4	−1.69
	100	11.810 4	11.142 3	−5.66
	110	14.835 1	13.636 1	−8.08

4　结　论

本文通过分析现代靶场的发展趋势，结合当今靶场对辐射测量设备测量要求，提出一种针对面目标的辐射特性测量方法。结合考虑积分时间的定标模型，推导出面目标辐射亮度计算方法。利用口径为 600 mm 的红外辐射特性测量系统在外场对系统的定标精度和面目标的测量误差进行验证。实验结果表明，辐射测量系统的定标误差

为1.7%，远远小于10%的定标误差要求，说明系统具良好的测量精度。将目标置于距红外辐射测量系统830 m处，在外场进行测量实验，通过定标得到增益和偏置反演，带入本文推导的亮度计算公式，计算出面目标的辐射亮度。与光谱修正后的辐亮度相比，系统的辐射测量误差为7.36%，远远小于30%的测量误差要求，证实本文推导的面目标的辐射亮度计算方法有效。该方法简单，可靠，为今后靶场辐射测量开辟了新途径。

参考文献：

[1] 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.
YANG C Y，ZHANG J P，CAO L H. Infrared radiation measurement based on real - time correction[J]. *Infrared Millim. Wave*，2011，30(3)：284-288. (in Chinese)

[2] 李波. 红外隐身技术的应用及发展趋势[J]. 中国光学，2013，6(6)：818-823.
LI B. Application and development trend of infrared stealth technology[J]. *Chinese Optics*，2013，6(6)：818-823. (in Chinese)

[3] 张晓龙，刘英，孙强. 高精度非制冷长波红外热像仪的辐射定标[J]. 中国光学，2012，5(3)：235-241.
ZHANG X L，LIU Y，SUN Q. Radiometric calibration of uncooled long - wave infrared thermal imager with high-precision[J]. *Chinese Optics*，2012，5(3)：235-241. (in Chinese)

[4] 李宁，张云峰，刘春香，等. 1 m口径红外测量系统的辐射定标[J]. 光学 精密工程，2014，22(8)：2054-2060.
LI N，ZHANG Y F，LIU CH X，*et al*.. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*，2014，22(8)：2054-2060. (in Chinese)

[5] SUN Z Y，CHANG S T，ZHU W. Radiometric calibration method for large aperture infrared system with broad dynamic range[J]. *Applied Optics*，2015，54(15)：4659-4666.

[6] 张晓龙，刘英，王健，等. 不同非均匀性校正温度的红外测温技术[J]. 中国光学，2014，7(1)：150-155.
ZHANG X L，LIU Y，WANG J，*et al*.. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures[J]. *Chinese Optics*，2014，7(1)：150-155. (in Chinese)

[7] 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]. 北京：中国科学院大学，2015.
CHANG S T. Research on infrared theodolite design and key technologies to improve the radiometry precision[D]. Beijing：University of the Chinese Academy of Sciences，2015. (in Chinese)

[8] 曹立华，李宁，杨词银，等. 3～5 μm红外探测器的辐射定标[J]. 红外与激光工程，2012，41(4)：858-864.
CAO L Y，LI N，YANG C Y，*et al*.. Radiation calibration for 3～5 μm infrared detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2012，41(4)：858-864. (in Chinese)

[9] 罗茂捷，周金梅，傅景能，等. 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标[J]. 红外与激光工程，2013，42(1)：36-40.
LUO M J，ZHOU J M，FU J N，*et al*.. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2013，42(1)：36-40. (in Chinese)

[10] 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.
SUN ZH Y，CHANG S T，ZHU W，*et al*.. Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibration[J]. *Opt. Precision Eng.*，2015，23(2)：356-362. (in Chinese)

[11] 杨词银，张建萍，曹立华. 基于大气透过率比例校正的目标辐射测量[J]. 光学 精密工程，2012，20(7)：1626-1635.
YANG C Y，ZHANG J P，CAO L H. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance[J]. *Opt. Precision Eng.*，2012，20(7)：1626-1635. (in Chinese)

[12] 杨词银，曹立华. 大口径红外光电系统辐射定标及误差分析[J]. 红外与激光工程，2014，40(9)：1624-1628.
YANG C Y，CAO L H. Radiation calibration and error analysis for a large - aperture infrared opto-electric system[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2014，40(9)：1624-1628. (in Chinese)

[13] 孙志远，王旻，常松涛. 环境温度对红外辐射测量精度的影响及修正[J]. 激光与红外，2014，44(5)：522-527.

SUN ZH Y,WANG M,CHANG S T. Effect and correction of environmental temperature on infrared radiation measurement precision [J]. *Laser & Infrared*,2014,44(5):522-527.(in Chinese)

[14] 孙志远. 基于中波红外探测器的常温目标测温实验研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2008.

SUN ZH Y. Experimental research of temperature measurement on the target in normal temperature based on MWIR detector [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics,Chinese Academy of Science,2008.(in Chinese)

[15] 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(5):0617003.

LI ZH,QIAO Y F,CHANG S T. High - speed calibration and non-uniformity correction for wide dynamic range infrared radiometric system [J]. *Infrared and Laser Engineering*,2017,46(5):0617003.(in Chinese)

作者简介:

乔铁英(1978—),男,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,高级工程师,主要从事靶场测量方面的研究。E-mail: 495889009@qq.com

李　周(1989 -),男,山东临沂人,博士研究生,主要从事红外辐射特性测量系统的定标和非均匀性校正方法方面的研究。E-mail: lizhou13@mails.ucas.ac.cn