

宽动态范围红外辐射测量系统快速定标算法

李 周^{1,2}, 乔彦峰¹, 常松涛¹, 何锋贇¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 红外辐射测量系统的宽动态范围定标通常是在多个温度点下, 设置多个积分时间并适当加入衰减片的方式实现的。其不仅效率低、耗时长、成本高且影响整个红外辐射测量系统实时性和机动性。对此, 在考虑积分时间的定标模型基础上, 提出宽动态范围快速定标方法。只需调节一次积分时间和一次温度即得到宽动态范围任意积分时间的定标方程。利用 $\Phi 400$ mm 红外辐射测量系统对快速定标方法的定标精度、测量精度进行验证。实验结果表明: 快速定标方法与直接定标结果之间最大误差为 2.75%, 该方法外场测量时最大辐射测量误差为 11.69%, 相比传统辐射测量最大误差不超过 1.52%。说明快速定标方法能有效地保证系统辐射定标精度, 提高辐射测量系统的定标效率, 缩短定标时间, 实现对系统宽动态范围任意积分时间的定标。整个辐射测量过程实时性好, 操作简单、易实现且可靠性高, 适应针对外场条件下红外辐射特性测量系统的要求, 外场测量结果也说明快速定标可以直接应用于靶场目标的红外辐射测量任务中。

关键词: 红外辐射测量系统; 快速定标; 宽动态范围; 定标效率

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0617003

High-speed calibration algorithm for wide dynamic range infrared radiometric system

Li Zhou^{1,2}, Qiao Yanfeng¹, Chang Songtao¹, He Fengyun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

Abstract: Several different integral times at multiple temperatures added by the attenuators are often required for the wide dynamic range infrared radiometric systems. It's not only inefficient, time-consuming and costly, but also affects real-time and mobility when used for the missions. Based on the calibration model considered integral time, the high-speed calibration algorithm was proposed for wide dynamic range and random integral time. The algorithm can obtain calibration equation for wide dynamic range and random integral time mainly by only turning one temperature point and one integral time point. The verifying experiments were performed by the $\Phi 400$ mm infrared radiometric systems, for purpose of the accuracy of calibrations and measurements by the algorithm mentioned above. Experimental results

收稿日期: 2016-10-05; 修订日期: 2016-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51275504)

作者简介: 李周(1989-), 男, 博士生, 主要从事红外辐射特性测量系统的定标和非均匀性校正等方面的研究。

Email: 15500027661@163.com

导师简介: 乔彦峰(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事地基靶场光学测量方面的研究。

show that the high-speed calibration algorithm compared with the direct calibration results maximum error is 2.75%, the maximum error radiant measurement is 11.69% and the maximum error compared to the conventional radiant measurement result is not more than 1.52%. The high-speed calibration algorithm can improve the efficiency of radiometric calibration, shorten the calibration time and achieve the equation of calibration at random time on the premise of the accuracy of consequences. The entire process of mission is real-time, simple operation, high reliability, easy to implement and suitable for the measurement requirements to infrared radiometric system, that can be directly applied to the target range of infrared radiometric missions.

Key words: infrared radiometric system; high-speed calibration; wide dynamic range; efficiency calibration

0 引言

红外热成像技术是把红外辐射转换为可视图像的技术,利用目标自身辐射的差异获得图像的细节。红外辐射特性测量则是在红外热成像的基础上,通过定标获得目标的辐射强度或者辐射亮度。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。所有红外系统不管是在实验室还是外场进行辐射特性测量之前都必须对其进行定标。地基红外观测设备的辐射定标常用的方法大体可以分为直接定标和间接定标。直接定标是以面源黑体为辐射定标源,将其置于光学系统入瞳处,进而完成辐射定标;间接定标则是以腔型黑体或者小面源黑体作为辐射定标源,配合平行光管等光学设备,实现辐射定标。以此为基础,学者们针对不同应用领域红外系统的定标做了更加深入的研究:李云红等研究定标与测量条件相同时的精确测温技术;杨词银、李宁等研究红外光电系统辐射定标及误差分析方法;孙志远、常松涛等提出针对大口径红外辐射特性测量设备提出了内外定标修正实现宽动态的定标方法并进行误差分析。

文中主要考虑到现代靶场测量目标特性,导弹及各类航空航天飞行器目标尾焰及其气热焰都具有温度高且亮度变化范围剧烈的特点,要求红外辐射测量系统在外场具有机动性高、动态范围广且实时性好。针对宽动态范围的定标测量,当前传统地红外系统常常需要在定标和测量时选取多组积分时

间,有时如果最低积分时间仍不能满足系统的动态范围要求,则需要增加衰减片,从而使得定标过程变得较为繁琐,导致定标效率低、定标成本高且耗时长。当前传统红外辐射特性系统针对宽动态范围目标的定标测量,已经不能很好地满足现代靶场对设备性能的要求^[1-6]。

针对上述存在的问题,文中在考虑时间的红外辐射测量定标基础上,提出宽动态范围任意积分时间的快速定标方法,只需要对积分时间和温度分别做一次调节即可得到宽动态范围的定标方程,在外场利用某 $\Phi 400$ mm 红外辐射测量系统应用快速定标方法获得定标方程,对定标结果进行误差分析。最后应用快速定标方法外场进行相关辐射特性测量实验,验证快速定标方法在外场的测量精度及可行性。

1 辐射定标及测量模型

1.1 红外辐射定标方法

定标是对红外辐射测量系统性能的测量。定标的基本原理是采用已知的红外辐射源,照明被定标的红外系统,根据不同辐射照明的系统输出信号,建立系统入瞳辐射量与系统输出之间的响应关系,从而获得系统的绝对辐射响应。对于制冷型红外探测器,其在某像元的灰度值可以表示成:

$$G_{i,j} = R_0 \times L_{Bb}(T_{Bb}) + G_{i,j}' \quad (1)$$

式中: $G_{i,j}$ 为探测器的灰度输出; R_0 为系统对输入辐射亮度的响应率; $L_{Bb}(T_{Bb})$ 为输入的辐射亮度; $G_{i,j}'$ 为未开机状态引起的初始灰度响应 $G_{i,j}'$ 可以表示为:

$$G_{i,j}' = G_{stray} + G_{dark} \quad (2)$$

式中： G_{stray} 为杂散辐射引起的灰度响应，杂散辐射可以定量表述为 $G_{\text{stray}}=R_0 \times L_{\text{stray}}$ ，其中 L_{stray} 为红外系统内部引起的杂散辐射亮度； G_{dark} 为探测器自身暗电流等因素引起的灰度响应^[7-9]。

目前，在靶场光电测量领域两种常见的定标方法：近距离均匀扩展面源法和平行光管法。近距离均匀扩展面源法是采用大面源黑体覆盖红外辐射测量系统入瞳，通过大面源黑体发出各个方向的平行辐射亮度照射测量系统，从而实现对红外辐射测量系统的定标。该方法可以有效地消除大气衰减和程辐射并同时实现对探测器上所有的像元的辐射定标。但对大口径宽动态范围的红外辐射测量系统，该方法需要大尺寸、宽温度范围的面源黑体，研制难度大、成本高；平行光管法则是使用红外平行光管对出射面积较小的中、高温腔型黑体红外辐射扩束后对红外辐射特性测量系统进行辐射定标。因此，大口径平行光管与腔型黑体的组合可以代替大面源黑体实现对大口径红外测量系统的定标，如图 1 所示。但大口径平行光管的制造周期长、成本高，特别是运输困难，限制了其在外场的应用^[10-13]。

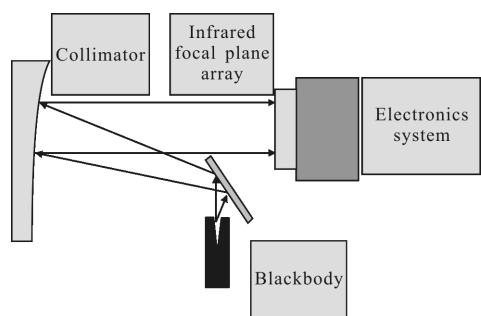


图 1 平行光管法定标

Fig.1 Calibration of collimator algorithm

1.2 宽动态范围定标基本理论

所谓的动态范围是指红外辐射测量系统所能够探测到辐射亮度或者温度的变化范围。宽动态范围即实现红外辐射特性测量系统对跟踪观测目标从高温到中低温的有效全覆盖。对于现代靶场来说，目标跟踪及设备隐身性能评估历来是红外靶场测量的重要内容。特别是随着技术的快速进步，各种新式高、超音速导弹以及飞行器层出不穷，这类武器突防能力强、速度快，动力强劲、温度变化范围大，实现对此类特征目标的跟踪识别需要红外测量系统具备更

宽的动态范围^[10]。

当前红外辐射测量系统在靶场光电测量应用时，考虑到对宽动态范围目标的定标精度要求，通常需要对关注的积分时间进行逐一辐射定标，存在工作量大，消耗时间长，实时性差的弊病。甚至某些红外成像系统在工作过程中为保证获得较好的目标图像，要求做到积分时间连续可调，而实际传统定标方法无法保证所有用到的积分时间都已进行定标。其次外场的宽动态范围的目标跟踪测量，由于跟踪目标温度变化地不确定性，只依靠积分时间调节无法保证探测器响应有效性（红外辐射测量系统在对目标进行跟踪测量时必须保证探测器靶面灰度既不能饱和和致使测量结果无效，又不能太低因噪声影响使得测量结果精度差）。这时红外辐射测量系统在定标时，通常选择多组积分时间，最短的积分时间仍致使探测器灰度值饱和，则需要增加衰减片。实际上，衰减片的调节是一项繁琐的费时的的工作，严重影响了靶场定标的实时性。

综上所述，在外场条件下，快速实现对宽动态范围任意积分时间红外辐射特性测量系统的定标具有重要的研究意义和应用前景。

1.3 辐射特性测量模型

地基红外辐射测量系统的焦平面探测器接受的能量来源主要包括^[4]：光学系统与目标之间大气自身辐射的辐射量 L_{path} ；目标辐射经大气衰减辐射能的辐射量 $\varepsilon_T \times \tau_{\text{atm}} \times L(T_T)$ ；目标对周围环境的反射经大气衰减的辐射能 $(1 - \varepsilon_T) \times \tau_{\text{atm}} \times L(T_E)$ 。其中 ε_T 为目标发射率， τ_{atm} 为大气透过率。 T_T 为目标表面温度， T_E 为环境温度。如图 2 所示。

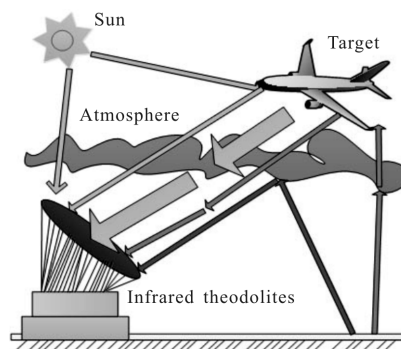


图 2 地基红外系统辐射测量系统示意图

Fig.2 Schematic of ground based of infrared radiometric system

则进行目标辐射特性测量时，探测器上某像元

灰度值可以表示为:

$$G_{i,j} = \varepsilon_T \times \tau_{\text{atm}} \times R_{i,j} \times L(T_T) + (1 - \varepsilon_T) \times \tau_{\text{atm}} \times R_{i,j} \times L(T_E) + R_{i,j} \times L_{\text{path}} + G_{i,j}' \quad (3)$$

式中: $R_{i,j}$ 和 $G_{i,j}'$ 分别为测量时相同积分时间下定标方程的响应率和初始偏置。

根据公式(3), 目标的辐射亮度表述为:

$$L(T_T) = \frac{(G_{i,j} - G_{i,j}' - (1 - \varepsilon_T) \times \tau_{\text{atm}} \times R_{i,j} \times L(T_E) - R_{i,j} \times L_{\text{path}})}{\varepsilon_T \times \tau_{\text{atm}} \times R_{i,j}} \quad (4)$$

式中: $R_{i,j}$ 和 $G_{i,j}'$ 可通过直接定标或者文中提出的快速定标方法计算得到, ε_T 和 T_E 通过测量得到, 大气透过率 τ_{atm} 和程辐射 L_{path} 可由 MODTRAN 等大气传输计算软件获得。由公式(4)得到被测目标的辐射亮度, 进而得到目标表面的温度分布, 这样就完成目标的辐射特性测量^[14-15]。

2 宽动态任意积分时间的快速定标

对地基红外辐射特性测量系统特别是靶场测量领域, 考虑到对定标测量精度等诸多因素, 通常采用近距离均匀扩展源法进行定标。该方法在上文已经详细介绍, 在此不再赘述。文中将采用该方法进行定标, 具体定标示意图如图 3 所示。

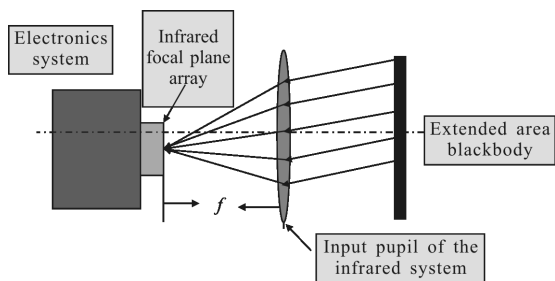


图 3 近距离面源辐射定标示意图

Fig.3 Schematic of the near extended source calibration

设黑体面源温度为 T_{Bb} , 发射率为 ε_{Bb} , 则黑体亮度可以表示为:

$$L_{\text{Bb}}(T_{\text{Bb}}) = \varepsilon_{\text{Bb}} \times L(T_{\text{Bb}}) = \frac{\varepsilon_{\text{Bb}}}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\text{Bb}}(\lambda, T_{\text{Bb}}) d\lambda \quad (5)$$

式中: $F_{\text{Bb}}(\lambda, T_{\text{Bb}})$ 为面源黑体的辐射通量。

在红外成像系统线性响应范围内, 探测器焦平面阵列上某像元灰度值可以表示为:

$$G_{i,j} = R_{i,j} \times L_{\text{Bb}}(T_{\text{Bb}}) + G_{i,j}' \quad (6)$$

式中: $R_{i,j}$ 为该系统对输入辐射亮度的响应率; $G_{i,j}'$ 为初始条件引起的灰度响应。

如果考虑积分时间 t , 则定标公式可以表述为:

$$G_{i,j} = t \times (R_{i,j} \times L_{\text{Bb}}(T_{\text{Bb}}) + G_{\text{stray}}) + G_{\text{dark}} \quad (7)$$

式中: t 为积分时间, 单位为 ms; 则 $R_{i,j}$ 和 G_{stray} 分别表示在 1 ms 的积分时间下的响应率和杂散辐射引起的灰度响应的变化。公式(7)即为含积分时间定标的数学模型。

从图 4 和图 5 分别显示在外场条件下, 利用红外辐射特性测量系统与面源黑体获得的输出灰度值与积分时间和辐射亮度的线性关系, 表明公式(7)的正确性。

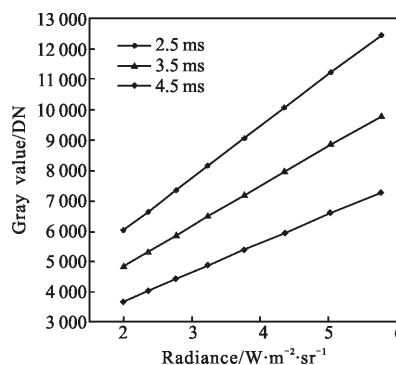


图 4 积分时间与灰度值的关系

Fig.4 Relationship between integration time and gray value

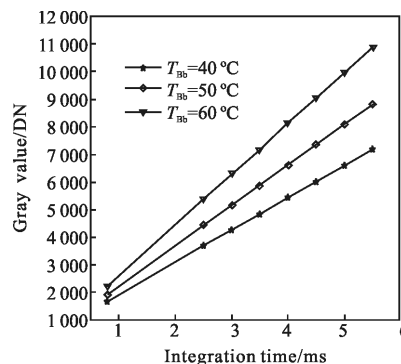


图 5 辐射亮度与输出灰度的关系

Fig.5 Relationship between radiance and output gray value

考虑外场条件下对定标及辐射测量的要求, 文中在基于考虑积分时间和杂散辐射量定标数学模型的基础上, 提出并详细介绍宽动态范围任意积分时间的红外辐射系统进行快速定标方法。

设定面源黑体得到线性区低温为 T_l , 调节红外探测器得到短积分时间为 t_s , 通过公式(7)得到公式(8):

$$G_{i,j}(t_s, T_l) = t_s \times (R_{i,j} \times L_{\text{Bb}}(T_l) + G_{\text{stray}}) + G_{\text{dark}} \quad (8)$$

保持面源黑体的温度 T_l 不变, 调长红外探测器的积分时间为 t_L , 得到公式(9):

$$G_{i,j}(t_L, T_l) = t_L \times (R_{i,j} \times L_{Bb}(T_l) + G_{stray}) + G_{dark} \quad (9)$$

最后, 保持红外探测器的积分时间 t_L 不变, 将面源黑体温度在线性区调节成高温 T_h , 得到公式(10):

$$G_{i,j}(t_L, T_h) = t_L \times (R_{i,j} \times L_{Bb}(T_h) + G_{stray}) + G_{dark} \quad (10)$$

需要强调的是, 在文中“任意积分时间”: 首先需要在不同的积分时间组合定标时, 要保证温度点的响应在线性区域。对于不同的红外测量系统, 其线性区间存在差异性。在进行快速定标时, 选择所谓具体高温点和低温点是由系统所决定。在实际应用中, 进行定标时积分时间和黑体温度选择的原则是: 在选定的积分时间下, 黑体辐射在探测器靶面上的响应灰度值应在探测器响应的线性区的 30%~70% 以内。

综上所述将公式(8)~(10)以线性方程进一步表述:

$$\begin{pmatrix} t_S \times L_{Bb}(T_l) & t_S & 1 \\ t_L \times L_{Bb}(T_l) & t_L & 1 \\ t_L \times L_{Bb}(T_h) & t_L & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{i,j} \\ G_{stray} \\ G_{dark} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{i,j}(t_S, T_l) \\ G_{i,j}(t_L, T_l) \\ G_{i,j}(t_L, T_h) \end{pmatrix} \quad (11)$$

最终得到:

$$\begin{pmatrix} R_{i,j} \\ G_{stray} \\ G_{dark} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_S \times L_{Bb}(T_l) & t_S & 1 \\ t_L \times L_{Bb}(T_l) & t_L & 1 \\ t_L \times L_{Bb}(T_h) & t_L & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} G_{i,j}(t_S, T_l) \\ G_{i,j}(t_L, T_l) \\ G_{i,j}(t_L, T_h) \end{pmatrix} \quad (12)$$

通过调节红外探测器的积分时间 t_S 和 t_L 以及调节面源黑体温度 T_l 和 T_h , 由普朗克公式计算出 $L_{Bb}(T_l)$ 和 $L_{Bb}(T_h)$ 。在每一次调节积分时间和温度后, 记录下灰度响应分别为: $G_{i,j}(t_S, T_l)$ 、 $G_{i,j}(t_L, T_l)$ 和 $G_{i,j}(t_L, T_h)$ 。带入公式(12)得到红外辐射响应率 $R_{i,j}$, 杂散辐射引起的像元灰度响应 G_{stray} 以及探测器自身暗电流引起的像元灰度响应 G_{dark} 。

在考虑时间的定标模型的基础上, 快速定标方法简化传统定标方法对宽动态范围繁琐地定标过程, 实现宽动态范围任意积分时间的红外测量系统的快速定标, 只需要对积分时间和黑体温度的一次调节, 便可以迅速得到系统的定标方程即任意积分时间下的定标方程。

总结上述快速定标方法, 选择合适的积分时间及黑体温度则辐射定标流程:

(1) 设定黑体温度为 T_l , 在积分时间为 t_S 和 t_L 下分别采集黑体的红外图像;

(2) 设定黑体温度为 T_h , 在积分时间为 t_L 下采集黑体红外图像;

(3) 根据公式(12)对获得的 3 幅黑体红外图像进行处理就可以得到探测器每个像元对应的 R_0 、 G_{stray} 和 G_{dark} 。

以上即为快速定标过程, 该方法避免对所有积分时间及所有温度点均进行定标的繁琐操作, 提高了辐射定标的效率。大大简化定标的过程, 尽可能的避免外场环境条件的变化对定标精度的影响。有效缩短在定标与测量时两者之间的时间差, 保证定标的有效性。设备的环境适应性有力地增强。快速定标的具体流程如图 6 所示。

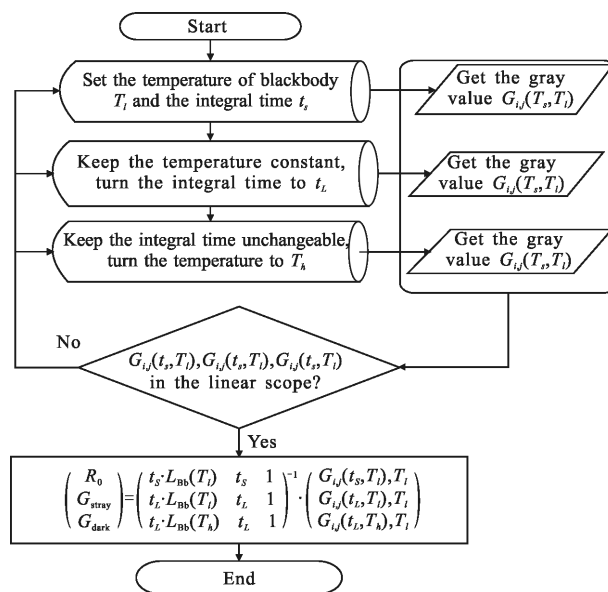


图 6 快速定标流程图

Fig.6 Flow chart of high-speed calibration

3 外场定标及辐射特性测量

为验证基于考虑积分时间的快速定标方法在辐射特性的测量精度上是否满足精度要求及实际应用的可行性, 文中在外场定标和目标辐射特性测量上开展一系列验证性实验。靶场经纬仪红外望远镜系统参数为: 工作波段 3.7~4.8 μm , 靶面像元数目为 320×256, 像元大小为 30 μm , 输出位数为 14 位; 主光学系统的口径为 400 mm, 焦距为 800 mm; 采用以色列 CI 公司生产的 SR800-20A 高精度的面源黑体对红外系统进行辐射定标。选取的积分时间为 5.5 ms 和 5 ms。图 7 显示辐射定标的现场图片。



图 7 显示辐射定标的现场

Fig.7 Shows the site of the radiometric calibration

3.1 快速定标方法及误差分析

对于红外测量系统, 由于红外焦平面阵列自身的加工、材料的不均匀性会造成相同的输入, 响应不同的顽疾问题, 为提高输出图像质量, 在进行定标以及辐射特性测量之前必须解决校准。考虑到文中定标测量实时性的要求, 应避免传统非均匀性校正对每个温度点逐一校正的繁琐过程。对此将验证适合宽动态范围, 基于现有定标数据的宽动态任意积分时间的非均匀性校正方法。其非均匀校正增益和偏置可以表述为^[10]:

$$\begin{cases} K_{(i,j)} = \frac{K_{ij}^{(t_s)} + K_{ij}^{(t_L)}}{2} \\ B_{ij}^{(t)} = \left| \frac{t-t_S}{t_L-t_S} \right| \times B_{ij}^{(t_s)} + \left| \frac{t_L-t}{t_L-t_S} \right| \times B_{ij}^{(t_L)} \end{cases} \quad (13)$$

选择积分时间 2.5 ms 和 5.5 ms, 黑体选择 30、70、110 °C, 以传统的黑体定标法为参实验证宽动态非均匀性校正法的校正效果。结果如图 8 所示。

从图 8 看出, 宽动态范围非均匀性校正方法时间和温度对校正结果影响不明显, 最大误差为 2.8%, 平均误差为 2.5%, 校正结果接近于传统逐一校正的结果, 可以实现宽动态范围任意积分时间的 NUC。该方法大大简化传统非均匀性校正的过程, 提高了效率和实时性, 适合外场条件下, 宽动态范围红外测量系统的对快速非均匀性校正的要求。

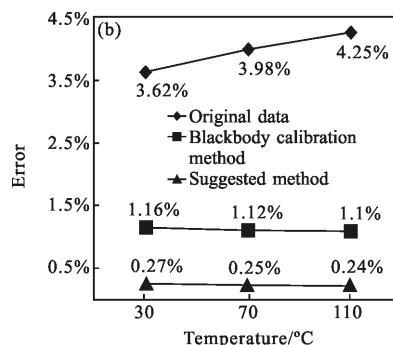
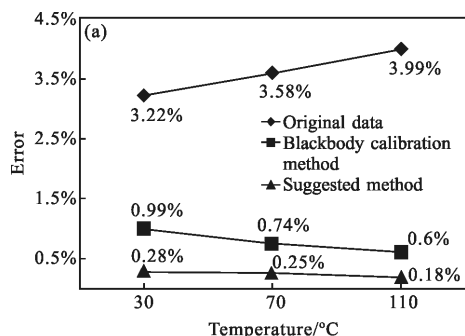


图 8 2.5 ms 和 5.5 ms 非均匀性校正的比较结果

Fig.8 Results of non-uniformity correction at 2.5 ms and 5.5 ms

对红外焦平面阵列非均匀性校正后, 根据文中提出的快速定标方法, 利用上述设备条件, 在外场验证快速定标方法对设备定标的可行性以及定标误差。首先选取黑体温度为 $T_1=40\text{ °C}$ 和 $T_2=60\text{ °C}$, 积分时间 $t_1=5.5\text{ ms}$ 和积分时间 $t_2=5\text{ ms}$ 。以中心像元 (160, 128) 为例。表 1 为获得的定标数据。

表 1 中心像元(160, 128)的定标数据

Tab.1 Calibration data of central pixel(160,128)

Temperature of blackbody/°C	Integral time/ms	Radiance /W·m ⁻² ·sr ⁻¹	Gray value/DN
40	5.5	1.936 5	7 186
40	5	1.936 5	6 607
60	5	3.649 5	9 962

根据公式(12)计算得到快速辐射定标的定标方程:

$$G_{(160,128)} = t \times (391.7104 \times L_{Bb}(T_{Bb}) + 399.4528) + 817.0000 \quad (14)$$

通过公式(14)理论上可以计算出在线性响应区域任意积分时间的由辐射亮度引起的灰度响应, 图 9 分别计算在 0.8、2.5、3、3.5、4、4.5 ms 的定标曲线, 并与上述积分时间下的实际定标结果进行比较,

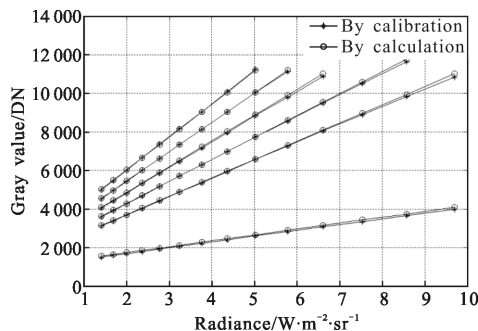


图 9 实际定标结果与计算值之间的误差

Fig.9 Error between the actual results and the calculations

在实验过程,黑体的温度设定为 30~90 °C,温度间隔步长为 5 °C。

统计得到文中快速定标方法结果与实际定标结果最大误差 2.75%,说明该快速定标方法可以保证定标精度。但是整个快速定标过程大大简化,耗时少,与测量任务的连续性好。

3.2 外场辐射测量实验

外场辐射测量实验是将以色列 CI 公司生产的 SR800-4A 高精度面源黑体作为被测目标,已知该黑体温度的变化范围为:0~125 °C,将其放置在红外辐射测量系统大约 500 m 的位置。

大气红外传输特性与外界条件密切相关,因此不同地点和不同时间下大气传输特性都是不同的。为了提高外场辐射特性测量试验时的大气传输修正计算精度。必须建立准确地辐射传输计算软件并实时地获取试验场地的环境气象数据。实验期间,地面气象观测站测量的气温为-3.4 °C、气压 985.5 hPa、相对湿度 58.9%,能见度测试仪显示结果为 33 km,所在位置为长春市海拔为 216 m。利用 MODTRAN

软件计算得到 3.7~4.8 μm 波段的大气平均透过率为 $\tau_{\text{atm}}=0.7222$,程辐射量为 $L_{\text{path}}=0.1175 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

中波红外相机在积分时间 2.5、3.5 和 4.5 ms 下采集 40、50、60、70、80、90 °C 的目标黑体图像,中波红外图像如图 10 所示。

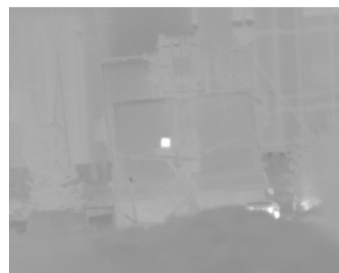


图 10 在 500 m 处获得中波红外图像
Fig.10 Mid-wave infrared image at 500 m

为了测试快速定标方法在外场进行辐射特性测量的可行性,利用上述的相关设备,分别利用传统辐射特性测量方法和文中提出的快速定标方法在辐射特性测量分别得到各自测量的辐射亮度,结果如表 2 所示。

表 2 目标中波红外辐射测量结果

Tab.2 Measurement results of mid-wave infrared radiation

Integral time/ms	Blackbody temperature/°C	Blackbody radiance /W · m ⁻² · sr ⁻¹	Tradition measure radiance /W · m ⁻² · sr ⁻¹	High-speed measure radiance /W · m ⁻² · sr ⁻¹	Error of fast radiance	Relative error of radiance
2.5	40	1.996 4	2.185 0	2.163 9	8.39%	-0.96%
	50	2.767 0	2.968 7	2.940 9	6.28%	-0.93%
	60	3.762 4	4.008 3	3.971 4	5.55%	-0.92%
	70	5.027 3	5.543 3	5.493 3	9.27%	-0.90%
	80	6.610 7	7.353 3	7.287 7	10.24%	-0.89%
	90	8.565 8	9.401 5	9.318 3	8.78%	-0.88%
3.5	40	1.996 4	2.196 6	2.167 7	8.58%	-1.31%
	50	2.767 0	3.076 1	3.032 9	9.61%	-1.40%
	60	3.762 4	4.077 3	4.017 9	6.79%	-1.45%
	70	5.027 3	5.515 5	5.432 9	8.07%	-1.49%
	80	6.610 7	7.379 3	7.266 5	9.92%	-1.52%
4.5	90	8.565 8	9.560 5	9.412 4	9.88%	-0.15%
	40	1.996 4	2.235 3	2.229 7	11.69%	0.25%
	50	2.767 0	3.017 9	3.010 3	8.79%	-0.25%
	60	3.762 4	4.062 8	4.052 6	7.71%	-0.25%
	70	5.027 3	5.411 2	5.397 7	7.37%	-0.24%
	80	6.610 7	7.211 9	7.193 9	8.82%	-0.24%
	90	8.565 8	9.518 3	9.494 6	10.84%	-0.24%

由表 2 的辐射测量结果可知,采用文中提出的红外辐射快速定标方法,在目标的中波红外辐射特性测量的最大误差为 11.69%,相比传统考虑时间的红外辐射特性的定标方法,目标中波红外辐射特性测量的最大误差只有 1.52%。从几个积分时间和温度点综合考虑,误差表现出均匀性,不会随温度和积分时间的变化出现显著波动。说明文中提出宽动态范围任意积分时间的红外辐射快速定标方法在外场辐射测量任务中,能够满足靶场对测量精度要求,可以直接应用于红外靶场的光电测量与跟踪任务,如图 11 所示。

11.69%, 相比于传统辐射测量最大误差不超过 1.52%。定标和测量误差显示,文中提出快速定标方法在保证辐射定标和测量精度的同时,避免对所有积分时间进行辐射定标的繁琐过程,提高了辐射定标的效率。将红外辐射快速定标方法在外场辐射测量任务中,能够很好地满足靶场对测量精度要求,可以直接应用于红外靶场的光电测量与跟踪任务。需要说明的是,为适应外场条件下非均匀性校正实时性的要求,避免对所有积分时间校正的繁琐过程,采用基于现有快速定标数据宽动态非均匀性校正方法,实验显示也接近于传统逐一校正结果。该方法大大地简化传统非均匀性校正过程,有效提高非均匀性校正的效率。整个辐射定标测量相比传统的定标测量方法连续性好,耗时短,操作简单,易实现,大大提高红外辐射测量系统外场操作的实时性和机动性,为今后靶场辐射特性测量开辟新思路和新途径。

参考文献:

[1] Li Yunhong, Wang Ruihua, Li Yuxuan. Dual waveband colorimetric temperature measurement technology and experiment[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(1): 71-75. (in Chinese)
李云红, 王瑞华, 李禹萱. 双波段比色测温技术及实验测试[J]. *激光与红外*, 2013, 43(1): 71-75.

[2] Li Ning, Zhang Yunfeng, Liu Chunxiang, et al. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(8): 2054-2060. (in Chinese)
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.

[3] Sun Z Y, Chang S T, Zhu W. Radiometric calibration method for large aperture infrared system with broad dynamic range[J]. *Applied Optics*, 54(15): 4659-4666.

[4] Chang Songtao. Research on infrared theodolite design key technologies to improve the radiometry precision[D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
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.

[5] Cao Lihua, Li Ning, Yang Ciyin, et al. Radiation calibration for 3-5 μm infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 858-864. (in Chinese)
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.

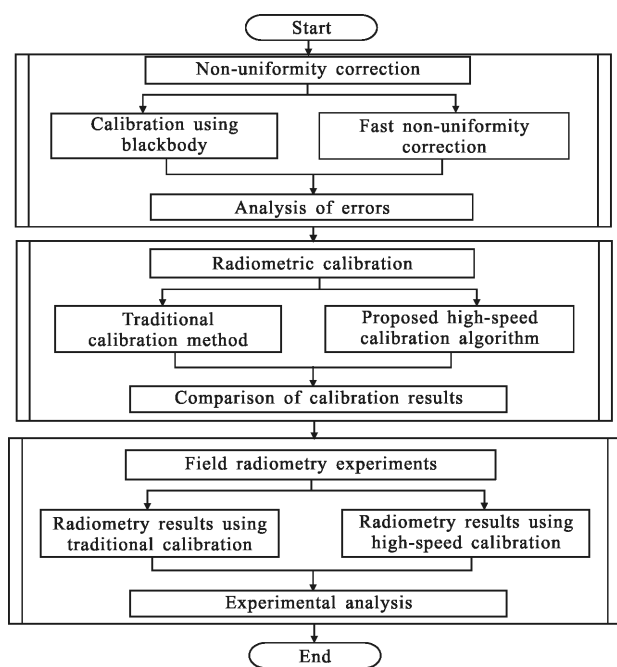


图 11 外场实验的流程图

Fig.11 Flow chart of field experiment

4 结论

文中根据现代靶场的发展趋势以及对未来靶场设备应用需求,通过分析传统宽动态范围定标测量方法在靶场应用存在的弊端,为此提出适用于外场宽动态范围任意积分时间的快速定标测量方法。该方法在探测器线性响应区域内,只需要调节一次积分时间和一次温度便获得快速定标方程。利用Φ400 mm 红外辐射测量系统在外场对快速定标方程的定标精度和测量误差进行验证。结果表明快速定标方法与直接定标之间的最大误差为 2.75%。在外场进行辐射测量结果显示,外场辐射测量的最大误差为

- [6] Luo Maojie, Zhou Jinmei, Fu Jingneng, et al. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (1): 36–40. (in Chinese)
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.
- [7] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei, 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)
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] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(7): 1626–1635. (in Chinese)
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.
- [9] Yang Ciyin, Cao Lihua. 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)
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.
- [10] Sun Zhiyuan, Wang Meng, Chang Songtao. Effect and correction of environmental temperature on infrared radiation measurement precision [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 522–527. (in Chinese)
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.
- [11] Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Simplifying method of radiance calibration for MWIR detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2132–2137. (in Chinese)
孙志远, 常松涛, 朱玮. 中波红外探测器辐射定标的简化方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2132–2137.
- [12] Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, et al. Radiance calibration for 3–5 μm infrared focal plane array [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(10): 2319–2325. (in Chinese)
李宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2319–2325.
- [13] Cao Y P, Tisse C L. Single-image-based solution for optics temperature-dependent non-uniformity correction in an uncooled long-wave infrared camera[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 646–648.
- [14] Sun Zhiyuan. 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 Sciences, 2008. (in Chinese)
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.
- [15] Ochs M, Schuiz A, Bauer H J. High dynamic range infrared thermography by pixel wise radiometric self calibration [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(2): 112–119.
- [16] Yu Yi, Chang Songtao, Wang Meng, et al. Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system[J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(7): 1932–1937. (in Chinese)
余毅, 常松涛, 王旻, 等. 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1932–1937.