

文章编号 1004-924X(2015)07-1932-07

## 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正

余 毅<sup>1,2</sup>, 常松涛<sup>2</sup>, 王 旻<sup>2</sup>, 赵立荣<sup>1,2\*</sup>, 姜会林<sup>1</sup>

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;  
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)

**摘要:**宽动态范围的红外辐射特性测量系统往往预设多个积分时间档位,并对每个积分时间逐一进行非均匀性校正。本文研究了不同积分时间下非均匀性校正系数有的差异问题,基于黑体定标法和积分时间法提出了新的非均匀性校正方法。该方法只需要得到两个积分时间和两个定标温度点即可得到全动态范围所有积分时间下的非线性校正系数,可在保证校正精度的同时减少辐射源温度点,降低校正时间。使用某  $\Phi 400$  mm 口径的地基红外辐射特性测量系统对该方法进行了验证。结果表明,采用本文方法后图像的非均匀性由 3.78% 减小到 0.24%。由 4 ms 下的校正数据可知,得到的校正结果接近直接用该积分时间进行校正的精度。提出的方法简化了所需设备,降低了校正时间,具有实时性强、精度高等特点,适用于外场测量。

**关键词:**制冷型红外探测器;辐射测量术;动态范围;积分时间;非均匀性校正  
**中图分类号:**TN219 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1932

## Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system

YU Yi<sup>1,2</sup>, CHANG Song-tao<sup>2</sup>, WANG Min<sup>2</sup>, ZHAO Li-rong<sup>1,2\*</sup>, JIANG Hui-lin<sup>1</sup>

- (1. College of Photoelectrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)  
\* Corresponding author, E-mail: cczhaolirong@163.com

**Abstract:** Several different integration time steps are often required for a high dynamic infrared radiometric system, therefore, its non-uniformity is usually corrected one by one. As there are different correction coefficients in different time, this paper proposes a new non-uniformity correction method based on blackbody calibration method and integration time calibration method. The method obtains nonlinear correction coefficients of all integration time in whole dynamic ranges only by two integration time steps and two calibration temperature points, meanwhile keeping correction accuracy, reducing measuring temperature points and correction time. The verifying experiments for the proposed method are performed by using a  $\Phi 400$  mm ground-based infrared radiometric system. The results show that the uniformity has reduced from 3.78% to 0.24% by using the proposed method. In addition, the result at 4 ms integration time illustrates that this method has a higher precision. Moreover,

收稿日期:2015-03-24;修订日期:2015-05-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA8082035)

it greatly reduces the required equipment and correction time, and is characterized by good real-time performance and suitable for field measurements.

**Key words:** cooled infrared detector; radiometry; dynamic range; integration time; non-uniformity correction

## 1 序言

随着红外焦平面阵列技术的迅速发展,红外热成像系统在军事和民用领域都得到了广泛的应用。红外辐射特性测量系统是热成像系统的一种,一般采用高性能的制冷型焦平面阵列探测器,主要用于定量获得目标辐射特性或温度信息,目前广泛应用于天文观测、红外遥感、红外制导和武器装备隐身效果检测等领域。受限于现有的制造工艺水平,红外焦平面阵列普遍存在非均匀性,从而影响红外测量系统的精度和成像质量,因此非均匀性校正(Non-uniformity Correction, NUC)是进行目标跟踪、检测和辐射特性测量之前必须解决的问题。

制冷型红外成像系统的红外焦平面器件所处的温度比较稳定(一般在 77 K 左右),其非均匀性主要来源于两方面:一是红外探测器自身的非均匀性,它主要是由于各像元有效感应面积、光谱响应率和半导体掺杂浓度的差异等因素引起的。对制冷型探测器而言,这一类非均匀性不受工作环境的影响,表现为固定乘性噪声和加性噪声。二是红外光学系统引起的非均匀性,包括镜头的加工和装调精度导致的成像非均匀性、离轴像元的渐晕和  $\cos^4$  分布导致的几何非均匀性和冷反射及成像系统组件(如镜片、滤光片、冷光阑、镜筒、遮光罩和一些支撑结构等)自身辐射引起的非均匀性<sup>[1]</sup>。这些因素对环境温度变化敏感,因此当红外成像系统的工作环境或工作状态变化时,需要重新进行非均匀性校正<sup>[2]</sup>。

目前,NUC 方法主要分为两类:基于定标的非均匀性校正(Calibration Based Non-uniformity Correction, CBNCC)和基于场景的非均匀性校正(Scene Based Non-uniformity Correction, SBNUC)。CBNUC 利用温度分布均匀的高发射率红外辐射源(如黑体)实现非均匀性的去除,可分为黑体定标法和积分时间法。尽管 CBNCC 的精度较高,但是需要温度非常均匀的定标辐射源;并且为了降低时间和工作环境变化引起的非均匀性,需要定期停止红外热成像系统的跟踪、测量工

作以进行校正系数表的更新和存储<sup>[3]</sup>。尤其是对宽动态范围系统而言,多个参考源温度及多积分时间将使 NUC 过程耗时长,不利于外场试验。相比之下基于场景的非均匀性校正不仅实时性强、不需要参考源,而且不需要打断系统的正常工作,因而得到了广泛应用。典型的 SBNUC 有时域高通滤波法、恒定统计法、人工神经网络法等<sup>[1-2,4]</sup>,但是这类方法的计算量大、校正精度低且易出现“鬼影”,从而影响红外系统的辐射特性测量精度,因此不常用<sup>[4]</sup>。

红外系统进行目标辐射特性测量时,探测器输出灰度值既不能过低(导致信噪比低、测量精度差)也不能饱和(使得测量结果无效)。因此为了实现宽动态范围测量,红外辐射特性测量系统的定标和非均匀性校正需要选取多组积分时间,并且需要多个不同温度的辐射源以覆盖入射目标温度的测量范围<sup>[5-6]</sup>。辐射特性测量系统采用基于定标的 NUC 方法,为减小 NUC 所需的时间、简化定标设备、提高实时性,本文提出一种适用于宽动态范围系统的 NUC 方法。首先通过理论和实验建立了考虑积分时间的辐射定标模型,在此基础上分析了黑体定标法和积分时间法的原理及其校正误差来源,然后结合这两种基于定标的非均匀性校正方法提出了一种新的 NUC 方法,并进行了实验验证。该方法只需要得到两个积分时间和两个定标温度点即可得到全动态范围所有积分时间下的 NUC 系数,在保证校正精度的同时减少了所需的辐射源温度点,降低了 NUC 所需的时间。

## 2 考虑积分时间的辐射定标模型

辐射定标是目标辐射特性测量前必须完成的工作,其目的是建立红外成像系统输入辐射量与输出灰度值之间的定量关系。为了尽量减小大气衰减和大气路径对辐射的影响,国内外普遍采用近距离扩展源定标方法(Near Extended Source, NES)<sup>[7-10]</sup>,定标原理如图 1 所示。

当前积分时间下黑体辐射亮度与系统输出灰度值(Digital Number, DN)的关系为:

$$DN_{i,j} = G_{i,j} \cdot L(T_b) + B_{i,j} \quad (1)$$

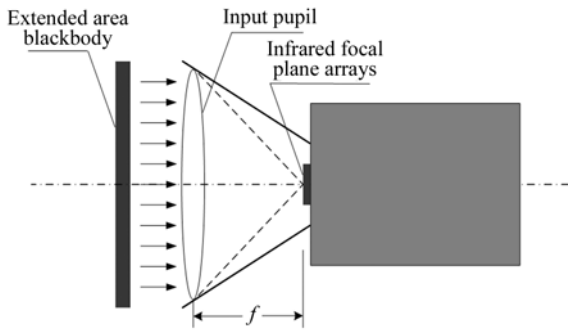


图 1 面源黑体辐射定标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radiometric calibration using extended area blackbody

其中:  $DN_{i,j}$  为红外探测器焦平面阵列 (Focal Plane Array, FPA) 像元  $(i, j)$  的响应灰度值,  $G_{i,j}$  为该像元对红外辐射亮度的响应率,  $B_{i,j}$  为成像系统杂散辐射和暗电流等因素引起的偏置,  $L(T_b)$  为定标源辐射亮度, 即:

$$L(T_b) = \frac{\epsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda, T_b) d\lambda, \quad (2)$$

其中:  $\epsilon$  为定标源发射率,  $T_b$  为定标源温度,  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  为探测器的工作波段,  $W(\lambda, T_b)$  为由普朗克公式得到的光谱辐射出射度。

对于高精度的红外辐射特性测量系统, 在探测器响应线性范围内积分时间与系统输出灰度值成正比。因此式(1)中偏置  $B_{i,j}$  为积分时间  $t$  的线性函数:

$$B_{i,j} = t \cdot DN_{out,i,j} + DN_{in,i,j}, \quad (3)$$

其中:  $t \cdot DN_{out,i,j}$  为由成像系统的杂散辐射(冷反射和冷光阑辐射等外部因素统称为杂散辐射)引起的偏置,  $DN_{in,i,j}$  为由暗电流等探测器自身因素引起的系统输出。

为了满足宽动态范围辐射亮度的测量需求, 红外成像系统通常设置多个积分时间档位。考虑红外探测器的积分时间, 定标方程为:

$$DN_{i,j} = t \cdot G_{i,j} \cdot L(T_b) + t \cdot DN_{out,i,j} + DN_{in,i,j}, \quad (4)$$

其中:  $t$  为积分时间,  $G_{i,j}$  为 1 ms 积分时间对应的辐射亮度响应率。该方程反映了系统输出灰度值与目标辐射亮度、积分时间之间的函数关系。宽动态范围的辐射特性测量系统需要根据目标的辐射特性选择一个或多个合适的积分时间, 所以在执行任务前应当获取所需积分时间下的辐射定标数据, 并且需要对各个积分时间逐一进行 NUC。由于对用于定标和校正的黑体温度范围要求高, 因此定标和校正过程较为繁琐。

### 3 两类基于定标的 NUC 及其误差机理分析

#### 3.1 黑体定标法

黑体定标法是在某一积分时间下, 采集不同温度下的定标源黑体图像进行校正, 包括单点校正法、两点校正法和考虑非线性的多点校正法等。对于响应线性的辐射特性测量系统, 工程上通常采用两点校正法校正偏置和增益。为减小时间随机噪声的影响, 采集图像时一般选择 20 帧取平均。假设积分时间  $t_0$  下, 黑体温度分别设置为低温  $T_1$  和高温  $T_h$ 。根据定标公式(4)得到:

$$\begin{cases} DN_{i,j}(T_1) = t_0 \cdot G_{i,j} \cdot L(T_1) + t_0 \cdot DN_{out,i,j} + DN_{in,i,j} \\ DN_{i,j}(T_h) = t_0 \cdot G_{i,j} \cdot L(T_h) + t_0 \cdot DN_{out,i,j} + DN_{in,i,j} \end{cases} \quad (5)$$

设红外焦平面阵列像元数为  $M \times N$ , 低温黑体图像的平均灰度值为  $\overline{DN}(T_1) = \frac{1}{M \times N} \cdot$

$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N DN_{i,j}(T_1)$ , 高温黑体图像的平均灰度值为  $\overline{DN}(T_h)$ 。两点校正法原理如图 2 所示,  $a, b$  和  $c$  为校正前各像元的响应, 校正后  $a', b'$  和  $c'$  重合, 即各像元响应一致。增益和偏置校正系数分别为:

$$\begin{cases} k_{i,j}^{(t_0)} = \frac{\overline{DN}(T_h) - \overline{DN}(T_1)}{DN_{i,j}(T_h) - DN_{i,j}(T_1)} \\ b_{i,j}^{(t_0)} = \overline{DN}(T_h) - k_{i,j} \cdot DN_{i,j}(T_h) \end{cases} \quad (6)$$

现有的研究和实验表明: 当积分时间改变时, 如果仍采用初始的校正系数, 则图像 NUC 效果

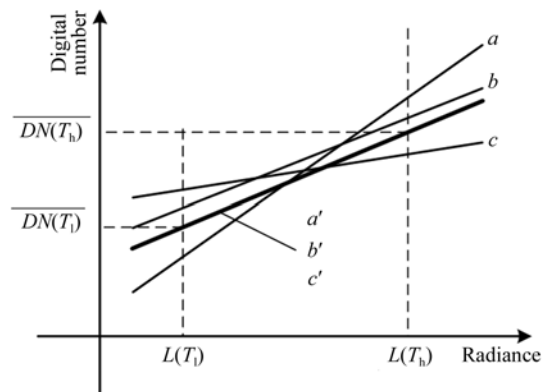


图 2 两点 NUC 原理图

Fig. 2 Schematic of two-point NUC

明显降低。黑体温度设置为  $T$ , 积分时间由  $t_0$  变为  $t$ , 如果仍采用  $t$  下的 NUC 系数, 则校正前:

$$DN_{i,j} = t \cdot G_{i,j} \cdot L(T) + t \cdot DN_{out,i,j} + DN_{in,i,j} \quad (7)$$

校正后:

$$\begin{aligned} DN_{i,j}^c &= k_{i,j}^{(t_0)} \cdot DN_{i,j} + b_{i,j}^{(t_0)} = \\ & \frac{DN(T_h) - DN(T_l)}{DN_{i,j}(T_h) - DN_{i,j}(T_l)} \cdot DN_{i,j} + \overline{DN(T_h)} - \\ & \frac{DN(T_h) - DN(T_l)}{DN_{i,j}(T_h) - DN_{i,j}(T_l)} \cdot DN_{i,j}(T_h) = \\ & t \cdot \bar{G} \cdot L(T) + (t - t_0) \cdot \frac{\bar{G}}{G_{i,j}} \cdot DN_{out,i,j} + \\ & t_0 \cdot \overline{DN_{out}} + \overline{DN_{in}}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $\bar{G}$  为像元平均响应率,  $\overline{DN_{out}} = \frac{1}{M \times N} \cdot$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N DN_{out,i,j}, \overline{DN_{in}} = \frac{1}{M \times N} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N DN_{in,i,j}.$$

理想的校正结果为:

$$\begin{aligned} \overline{DN} &= \frac{1}{M \times N} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N DN_{i,j} = \\ & t \cdot \bar{G} \cdot L(T) + t \cdot \overline{DN_{out}} + \overline{DN_{in}}. \end{aligned} \quad (9)$$

因此校正误差为:

$$\begin{aligned} \Delta DN_{i,j} &= DN_{i,j}^c - \overline{DN} = \\ & (t - t_0) \cdot \left\{ \frac{\bar{G}}{G_{i,j}} \cdot DN_{out,i,j} - \overline{DN_{out}} \right\} = \\ & (t - t_0) \cdot \bar{G} \cdot (L_{out,i,j} - \overline{L_{out}}), \end{aligned} \quad (10)$$

其中: 杂散辐射的等效亮度  $L_{out,i,j} = DN_{out,i,j} / G_{i,j}$ 。只有当  $L_{out,i,j} = \overline{L_{out}}$ , 即杂散辐射完全均匀时才能保证  $\Delta DN_{i,j} = 0$ 。这是很难实现的, 因为镜头的加工和装调精度、离轴像元的渐晕、冷反射及成像系统组件的自身辐射都可能引起杂散辐射的非均匀性, 特别是在高精度、大口径或者结构复杂的红外系统中, 这种非均匀性更为严重。

由式(10)可知, 必须对所需的所有积分时间进行 NUC, 而不能由某个积分时间代替, 否则会产生原理性误差。因此采用黑体定标法定标宽动态范围红外系统时, 需要逐一校正所有积分时间, 相应地要求黑体覆盖较高的温度范围, 有时还会用到多个参考源, 造成外场试验设备复杂且 NUC 耗时长。此外任务中需要长时间打断系统的观测任务以进行 NUC, 显然也是不合适的。

### 3.2 积分时间法

一些用于目标辐射特性测量(或者红外测温)的热像仪会提供一种备用的 NUC 方法, 即积分时间法。当辐射源温度不可变或者不具备两点校正(高、低温两个温度点)条件时, 该方法可以直接

将黑体、靶标或天空背景等作为辐射源进行校正。

当辐射源温度保持稳定时系统输出灰度与积分时间成线性, 因此可以用两个积分时间点( $t_1$  和  $t_h, t_l < t_h$ )进行 NUC, 实现偏置和增益的校正。其原理与两点校正法类似, 设定标源温度为  $T_0$ , 得到的增益和偏置校正系数分别为:

$$\begin{cases} k_{i,j}^{(T_0)} = \frac{DN(t_h) - DN(t_l)}{DN_{i,j}(t_h) - DN_{i,j}(t_l)} \\ b_{i,j}^{(T_0)} = \overline{DN(t_h)} - k_{i,j}^{(T_0)} \cdot DN_{i,j}(t_h) \end{cases} \quad (11)$$

黑体温度设为  $T$ , 积分时间为  $t$ , 根据定标公式(4)得到系统输出灰度值:

$$DN_{i,j}(T) = (G_{i,j} \cdot L(T) + DN_{out,i,j}) \cdot t + DN_{in,i,j} \quad (12)$$

校正后:

$$\begin{aligned} DN_{i,j}^c(T) &= k_{i,j}^{(T_0)} \cdot DN_{i,j}(T) + b_{i,j}^{(T_0)} = \\ & \frac{\bar{G} \cdot L(T_0) + \overline{DN_{out}}}{G_{i,j} + DN_{out,i,j}} \cdot [G_{i,j} \cdot L(T) + \\ & DN_{out,i,j}] \cdot t + \overline{DN_{in}}. \end{aligned} \quad (13)$$

因此校正误差为:

$$\begin{aligned} \Delta DN_{i,j} &= DN_{i,j}^c - \overline{DN} = \\ & [L(T) - L(T_0)] \cdot \\ & \frac{\bar{G} \cdot L(T) + \overline{DN_{out}}}{G_{i,j} \cdot L(T_0) + DN_{out,i,j}} \cdot G_{i,j} \cdot t. \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可知采用积分时间法进行 NUC, 当场景变化即  $L(T) \neq L(T_0)$  时, 图像均匀性变差。因此该校正方法适合校正源与观测目标和背景的辐射亮度接近的情况, 不适合宽动态范围辐射特性测量系统。

## 4 宽动态范围红外辐射特性测量系统 NUC 方法

基于黑体定标的 NUC 原理简单、精度高, 是最常用的方法, 但是由于本文的宽动态范围系统需要对所有积分时间进行 NUC, 从而导致基于黑体定标的 NUC 方法工作量大、系统复杂且实时性差。基于积分时间的 NUC 方法不需要多个校正温度点, 对系统要求低且实时性强, 可以一次校正并获得所有积分时间下的 NUC 系数。但是该方法具有局限性, 即需要校正源和观测目标、背景的温度接近, 因此不适合应用于宽动态范围系统 NUC。本文结合这两种 CBNCC 方法的优点, 提出了一种适合宽动态范围、多积分时间红外辐射特性测量系统的 NUC 方法。该方法只需选取两个不同的黑体温度和两个积分时间, NUC 具体流

程如下:

(1) 设定积分时间  $t_1$ , 黑体温度  $T_1$  和  $T_h$  ( $T_1 < T_h$ ) 进行非均匀性校正, 得到校正系数  $k_{i,j}^{(t_1)}$  和  $b_{i,j}^{(t_1)}$ ;

(2) 设定积分时间  $t_h$  ( $t_1 < t_h$ ), 黑体温度  $T_1$  和  $T_h$  进行非均匀性校正, 得到校正系数  $k_{i,j}^{(t_h)}$  和  $b_{i,j}^{(t_h)}$ ;

(3) 根据以上定标结果计算得到任意积分时间  $t$  下的 NUC 系数为:

$$\begin{cases} k_{i,j}^{(t)} = \frac{k_{i,j}^{(t_1)} + k_{i,j}^{(t_h)}}{2} \\ b_{i,j}^{(t)} = \frac{t-t_1}{t_h-t_1} \cdot b_{i,j}^{(t_1)} + \frac{t_h-t}{t_h-t_1} \cdot b_{i,j}^{(t_h)} \end{cases} \quad (15)$$

NUC 温度点和积分时间选取时需要保证  $T_1$  和  $T_h$  在积分时间  $t_1$  和  $t_h$  下处在线性响应范围内, 一般要求探测器的响应灰度值在线性响应区的 30%~70%。采用式(15)中的校正系数校正积分时间为  $t$ , 温度为  $T$  的黑体图像。原始图像灰度值可表示为式(7), 则校正后有:

$$\begin{aligned} DN_{i,j}^c &= k_{i,j}^{(t)} \cdot DN_{i,j} + b_{i,j}^{(t)} = \\ \frac{\bar{G}}{G_{i,j}} &\cdot [t \cdot G_{i,j} \cdot L(T) + t \cdot DN_{out,i,j} + DN_{in,i,j}] + \\ t \cdot &\left[ \overline{DN_{out}} - \frac{\bar{G}}{G_{i,j}} \cdot DN_{out,i,j} \right] + \\ &\left[ \overline{DN_{in}} - \frac{\bar{G}}{G_{i,j}} \cdot DN_{in,i,j} \right] = \\ t \cdot \bar{G} \cdot &L(T) + t \cdot \overline{DN_{out}} + \overline{DN_{in}}. \end{aligned} \quad (16)$$

结合理想校正结果  $\overline{DN}$  (用式(9)表示), 得到校正误差:

$$\Delta DN_{i,j} = DN_{i,j}^c - \overline{DN} = 0. \quad (17)$$

由此说明本文方法在原理上是合理的, 即校正后可以有效地计算得到任意积分时间下的 NUC 系数。对宽动态范围 NUC 而言, 该方法由于只需要两个黑体温度点, 降低了系统外场 NUC 的设备需求; 而不需要在所有积分时间下进行 NUC 则意味着校正时间大大缩短, 系统的正常工作不会因 NUC 而中断。

## 5 实验

基于本文提出的 NUC 方法对某 400 mm 口径红外辐射特性测量系统进行了 NUC 验证实验。光学系统的焦距为 800 mm,  $F$  数为 2; 红外焦平面阵列探测器的工作波段为 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ , 像元数为 320×256, 像元尺寸为 30  $\mu\text{m}$ ×30  $\mu\text{m}$ , 输出位数为 14; 定标源为 CI 公司的 SR800 高精度面源黑体, 辐射面积为 500 mm×500 mm, 温度

为 5~150  $^{\circ}\text{C}$ , 温度精度为 0.1  $^{\circ}\text{C}$ , 发射率为 0.97。实验装置如图 3 所示。

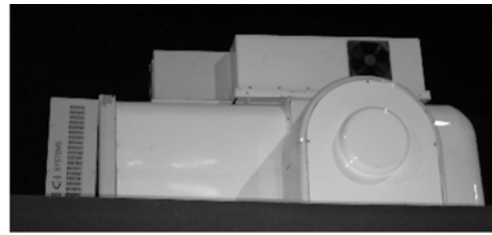
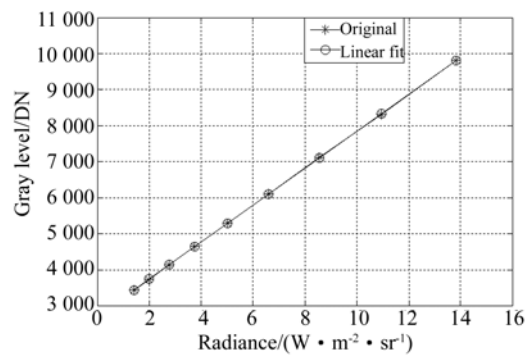


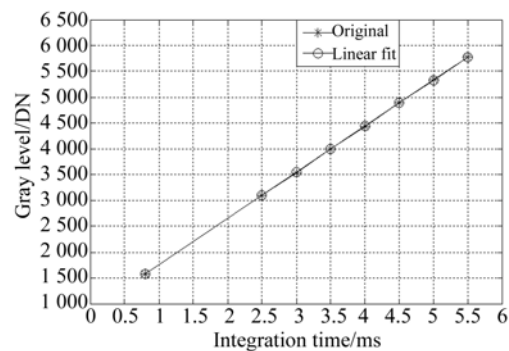
图 3 辐射定标和 NUC 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for calibration and NUC



(a) 系统输出灰度与辐射亮度关系

(a) Relationship between system output and radiance



(b) 系统输出灰度与积分时间关系

(b) Relationship between system output and integration time

图 4 定标结果

Fig. 4 Calibration results

为验证系统响应与目标辐射亮度、积分时间的线性关系, 进行了辐射定标实验。积分时间固定为 4 ms, 黑体温度设为 30~100  $^{\circ}\text{C}$ , 辐射定标结果如图 4(a)所示, 由图可知系统对辐射亮度的响应是线性的。将黑体温度固定为 60  $^{\circ}\text{C}$ , 积分时间设为 0.8, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 和 5.5 ms 得到积分时间与系统输出灰度的关系如图 4(b)所示,

可见该成像系统积分时间与系统输出呈很好的线性关系。

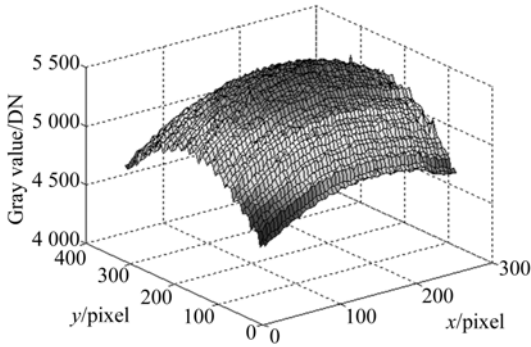


图 5 积分时间为 4 ms 时 70 °C 均匀黑体的图像

Fig. 5 Image of 70 °C uniform blackbody at integral time of 4 ms

图 5 为系统对均匀黑体辐射源所成的原始图像,可见存在明显的非均匀性,因此对该系统进行 NUC 是必要的。为评价红外焦平面阵列的非均匀性和 NUC 结果,国内外学者提出多种非均匀度 (NU) 评价指标,目前最具有实用意义的为<sup>[11]</sup>:

$$\left\{ \begin{aligned} \text{NU} &= \frac{1}{\overline{\text{DN}}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - d} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\text{DN}_{i,j} - \overline{\text{DN}})^2} \times 100\%, \\ \overline{\text{DN}} &= \frac{1}{M \times N - d} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \text{DN}_{i,j} \end{aligned} \right. \quad (18)$$

其中: $\overline{\text{DN}}$ 为红外焦平面探测器的响应均值,不包含坏元; $d$ 是坏元的个数。

采用 3 种方法进行 NUC,结果如表 1 所示。积分时间选择 2.5, 4 和 5.5 ms,黑体温度选择 30, 70 和 110 °C,图像初始 NU 均值为 3.78%。首先采用基于黑体定标的 NUC 方法,低温为 60 °C、高温为 70 °C、积分时间为 4 ms,得到校正后 NU 的均值为 0.68%。由于直接对 4 ms 积分时间进行 NUC,该方法对 4 ms 下的精度较高 (<0.19%),但是其他积分时间下仍采用 4 ms 时的 NUC 结果会导致精度降低,降至 1.16%。然后采用基于积分时间的 NUC 方法,黑体为 70 °C,积分时间为 3.5 和 4 ms,得到校正后 NU 的均值为 0.47%。该方法对 70 °C 下的精度较高 (<0.24%),但是其他温度下精度明显降低,降至 0.92%。采用本文方法,选择积分时间为 3.5 和 4 ms、黑体温度为 60 和 70 °C,得到校正后 NU 均值为 0.24%,在 4 ms 下接近于黑体定标法,说明该方法有效。

表 1 非均匀性校正结果比较

Tab. 1 Comparison of results among three NUC methods

| 积分时间/ms | 黑体温度/°C | 初始非均匀性/% | 基于黑体定标的 NUC/% | 基于积分时间的 NUC/% | 本文方法/% |
|---------|---------|----------|---------------|---------------|--------|
| 2.5     | 30      | 3.22     | 0.99          | 0.92          | 0.28   |
|         | 70      | 3.58     | 0.74          | 0.24          | 0.25   |
|         | 110     | 3.99     | 0.60          | 0.48          | 0.18   |
| 4       | 30      | 3.42     | 0.18          | 0.65          | 0.24   |
|         | 70      | 3.80     | 0             | 0             | 0.22   |
|         | 110     | 4.14     | 0.19          | 0.57          | 0.21   |
| 5.5     | 30      | 3.62     | 1.16          | 0.45          | 0.27   |
|         | 70      | 3.98     | 1.12          | 0.22          | 0.25   |
|         | 110     | 4.25     | 1.10          | 0.73          | 0.25   |
| 均值 NU/% |         | 3.78     | 0.68          | 0.47          | 0.24   |

注:表中 0 表示该温度、积分时间点为校正选取的点,NU 值为 0。

本文提出的 NUC 方法精度高,且对目标温度和积分时间均不敏感,因此可实现任意积分时间和目标温度下的 NUC。在外场实验中可以选择两个较为接近的黑体温度,升温快,实验实时性好。另外也可采用挡板和黑体组合,校正前将黑体稳定在某个温度(高于环境温度),这样与挡板就可组成两个不同辐射源用于 NUC。

## 6 结 论

本文建立了考虑积分时间的定标模型,并在此基础上分析了黑体定标法和积分时间法两种常用的 NUC 方法,说明了其应用的局限性。然后,结合二者优点提出了一种适合宽动态范围辐射特性测量系统的基于定标的 NUC 方法。该方法比基于场景的非均匀性校正法的精度高,适用于定量测量系统。与黑体定标法相比,该方法应用于多积分时间系统时可大大减小工作量、简化设备、提高系统实时性;与积分时间法相比,该方法克服了温度对校正效果的影响,更具实用价值。另外,该方法的优点还在于可以通过简单计算获得任意积分时间的 NUC 系数,适用于积分时间任意可调(为获得最优的图像质量和信噪比,有些系统在工作时可自适应调节积分时间)的红外辐射特性测量系统。

## 参考文献:

- [1] CAO Y P, TISSE C L. Single-image-based solution for optics temperature-dependent nonuniformity correction in an uncooled long-wave infrared camera [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 646-648.
- [2] 白俊奇, 陈钱, 钱惟贤, 等. 基于环境温度的红外焦平面阵列非均匀性校正[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(1): 49-52.  
BAI J Q, CHEN Q, QIAN W X, *et al.*. Nonuniformity correction for infrared focal plane arrays based on environmental temperature [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2010, 29(1): 49-52. (in Chinese)
- [3] VENKATESWARLU R, ER M H, GAN Y H, *et al.*. Nonuniformity compensation for IR focal plane array sensors [J]. *SPIE*, 1997, 3061: 0277-788X.
- [4] LEATHERS R A, DOWNES T V, PRIEST R, *et al.*. Scene-based nonuniformity corrections for optical and SWIR pushroom sensors [J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 5136-5150.
- [5] OCHS M, SCHULZ A, BAUER H J. High dynamic range infrared thermography by pixelwise radiometric self calibration [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53: 112-119.
- [6] SVENSSON T, RENHORN I. Evaluation of a method to radiometric calibrate hot target image data by using simple reference sources close to ambient temperature [J]. *SPIE*, 2010, 7662: 76620.
- [7] MERMELSTEIN M D, SNAIL K A, PRIEST R G. Spectral and radiometric calibration of midwave and longwave infrared cameras [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39: 347-352.
- [8] WOLFE W L. *Introduction to Radiometry* [M]. Bellingham: SPIE, 1998.
- [9] HOLST G C. *Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems* [M]. Bellingham: JCD, 1993.
- [10] 李宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5  $\mu\text{m}$  红外焦平面阵列的辐射定标 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2319-2325.  
LI N, YANG C Y, CAO L H, *et al.*. Radiance calibration for 3~5  $\mu\text{m}$  infrared focal plane array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2319-2325. (in Chinese)
- [11] 中国科学院上海技术物理研究所. GB/T 17444-1998 红外焦平面阵列特性参量测试技术规范[S]. 北京: 中国标准社, 1998.  
Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences. GB/T 17444-1998 *The technical norms of measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays* [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 1998. (in Chinese)

## 作者简介:



余毅(1979—),男,江西九江人,博士研究生,副研究员,主要从事靶场光电测量总体技术的研究。E-mail: yuyici-omp@139.com



赵立荣(1971—),女,吉林桦甸人,研究员,1992年于吉林工学院获得学士学位,1999年于长春光机所获得硕士学位,主要从事视频判读、数据处理等方面的研究。E-mail: cczhaolirong@163.com

## 导师简介:



姜会林(1945—),男,辽宁人,教授,博士生导师,1969年于长春理工大学获得学士学位,1981年,1987年于中科院长春光机所分别获得硕士、博士学位,主要研究领域为光电技术与光学仪器。E-mail: HLJIANG@public.cc.jl.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)