

红外成像系统响应光谱非均匀性的理论分析

于海涛¹, 马金鹏^{2*}, 范芸², 李科², 张春熹¹

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300300)

摘要: 基于黑体标定的非均匀性校正方法在凝视红外成像系统中被广泛应用,但在面对天空背景成像或者高速飞行器上透过高温光学窗口观察常温目标两种情况下,出现了黑体标定不适用的现象。为此通过分析红外成像系统的响应特性,提出了响应光谱非均匀性的概念,指出了黑体标定法具有场景光谱分布依赖的特征。同时,分析了响应光谱非均匀性产生的原理,包括内外两方面原因。内在因素是红外探测器不同像元的量子效率随光谱变化存在差异,外在因素是应用场景的辐射光谱分布与黑体相差较大。在此基础上,给出了解决响应光谱非均匀性的建议。

关键词: 红外成像; 非均匀性; 响应光谱

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0204002

Theory of nonuniformity related to spectrum response in IR imaging system

Yu Haitao¹, Ma Jinpeng^{2*}, Fan Yun², Li Ke², Zhang Chunxi¹

(1. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Tianjin Jinhang Technical Physics Institute, Tianjin 300300, China)

Abstract: Non-uniformity correction based on blackbody calibration is widely used in staring infrared imaging system. But in some cases, blackbody calibration method is not applicable. Two kinds of cases were presented: when the IR imaging system facing to the sky background, or observing normal objects through high temperature optical window in high speed aircraft. Based on the analysis of the response characteristics of infrared imaging system, the concept of non-uniformity with response spectral was proposed. It was pointed out that the correction results of blackbody calibration method depended on the spectral distribution of scene. The principle of non-uniformity with response spectrum was analyzed, which included internal and external reasons. The intrinsic factor was that the quantum efficiency of different pixels of infrared detector varies with spectrum, and the external factor was that the radiation spectrum distribution of application scene was quite different from blackbody. Suggestions were given to solve response spectral non-uniformity.

Key words: IR imaging; non-uniformity; response spectrum

收稿日期: 2018-09-19; 修订日期: 2018-10-25

作者简介: 于海涛(1982-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事光学传感及图像处理技术等方面的研究。Email: yuhaitao608@aliyun.com

0 引言

红外探测器是红外成像系统的核心器件，作为焦平面阵列半导体器件，理想情况下红外焦平面阵列受均匀辐照时，各探测元输出幅度应完全一样，但是由于受材料、工艺的影响，各探测元性能参数具有离散性，响应输出不相同，即为非均匀性现象，需要进行非均匀性校正，才能满足使用要求。目前工程上主要应用基于黑体标定的非均匀性校正方法^[1-5]，在均匀参考源照射下，测量探测器各像元的响应值，计算并存储校正参数，工作过程中读取参数进行运算，完成非均匀性校正。

在标定类的校正方法中，通常以黑体作为标定源，以图像灰度信息作为判定条件来选择工作点。但是量子型探测器的响应特征不仅与场景的辐射强度有关，还与光谱分布特征相关，而以黑体作为标定源标定后的图像灰度只与场景的辐射强度关联。文中基于红外探测器的光谱响应特性，研究场景辐射光谱分布对非均匀性标定校正的影响，提出了响应光谱非均匀性的概念，对光谱非均匀性的产生和作用进行了仿真分析，并给出了应用实例。

1 非均匀性标定校正的基本原理

红外成像非均匀性产生的原因是响应特性差异。对于红外成像系统，面对绝对温度为 T 的黑体辐射，黑体辐射亮度为 $L(\lambda, T)$ ，探测器量子效率为 $\eta_i(\lambda)$ 、光敏元面积为 A_i ，则在有效积分时间 τ_{int} 内响应输出可以表示为：

$$X_i(T) = \left[\tau_{\text{eff}} \tau_{\text{int}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta_i(\lambda) L(\lambda, T) d\lambda \right] A_i \Omega_i + D_i \quad (1)$$

$$\Omega_i = \frac{\pi \cos^4 \theta_i}{4(F/\#)^2 + 1} \quad (2)$$

式中： τ_{eff} 为光学系统透过率； θ_i 为像元相对于光学系统中心轴的偏移角； Ω_i 像元 i 相对于光学系统出瞳的立体角； D_i 为像元 i 暗电流在积分时间内所累积的电荷数。

对于相同的入射辐射条件，各像元之间响应特性差异造成输出结果不一致，产生非均匀性现象。采用基于黑体的两点标定法进行非均匀性校正，校正过程如图 1 所示。通过偏置和增益两组参数使响应曲线一致。

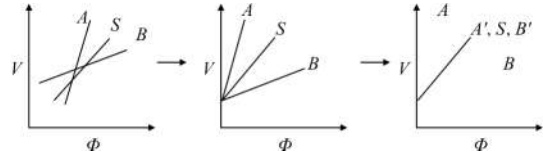


图 1 两点非均匀性校正原理

Fig.1 Principle diagram of two point non-uniformity correction (NUC)

具体实施中，用一个高温黑体(T_1)和一个低温黑体(T_2)作为标定源，按公式(3)计算每个像素点的增益和偏置校正参数。

$$\begin{cases} K_i = \frac{X_i^{T_1} + X_i^{T_2}}{X_i^{T_1} - X_i^{T_2}} \\ B_i = X_i^{T_1} + K_i X_i^{T_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $X_i^{T_1}$ 和 $X_i^{T_2}$ 分别表示像素点 i 对高温黑体 T_1 和低温黑体 T_2 的响应值； X^{T_1} 、 X^{T_2} 表示探测器对高温黑体和低温黑体响应的平均值。

标定后，在工作时调用校正参数，根据公式(4)进行实时校正，得到校正后图像。

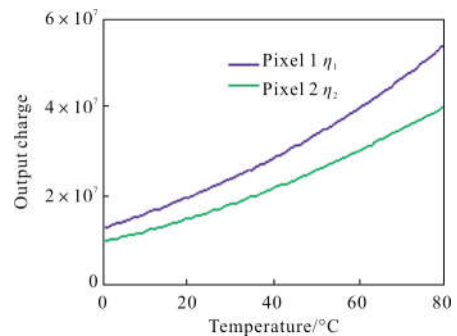
$$Y_i = K_i X_i + B_i \quad (4)$$

利用公式(5)表征红外图像的非均匀性，即所有像元响应输出的方差与均值比。

$$NU = \frac{1}{Y(T)} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i(T) - \overline{Y(T)})^2} \quad (5)$$

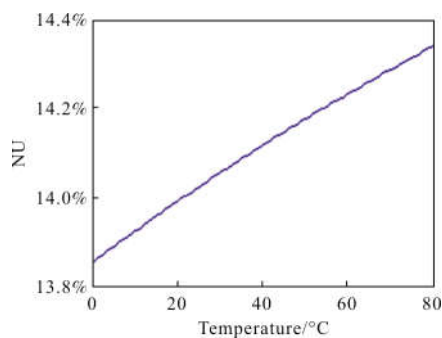
实际应用中，为满足较大的辐射动态范围，应用分段两点校正方法对系统工作温度段进行分段处理，在每个温度段内进行两点校正。

对红外成像及非均匀性校正过程进行模拟。图 2(a)中根据响应曲线模拟生成了两个像元的响应曲线，具有不同的响应率；图 2(b)中计算了两条曲线在不同



(a) 响应曲线

(a) Response curve



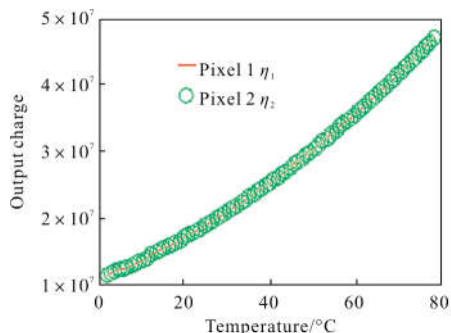
(b) 非均匀性

(b) Non-uniformity

图 2 模拟生成校正前响应曲线和残余非均匀性

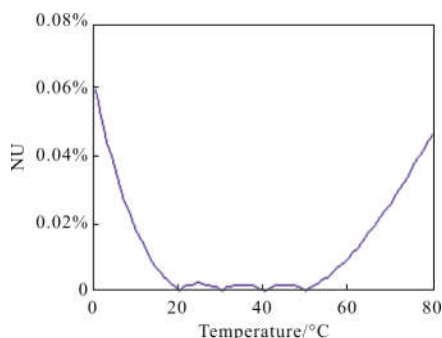
Fig.2 Pre-correction response curve and non-uniformity by simulation

温度点的非均匀性。应用分段两点校正对两个像元进行校正,以 20、30、40、50 °C 为标定的温度点。图 3(a) 中给出了校正后两像元响应曲线,图 3(b)是校正后的非均匀性,非均匀性显著下降。



(a) 响应曲线

(a) Response curve



(b) 非均匀性

(b) Non-uniformity

图 3 模拟生成校正响应曲线和非均匀性

Fig.3 Corrected response curve and non-uniformity by simulation

2 响应光谱非均匀性

标定类校正方法具有场景依赖的特性,当使用场景与标定场景不一致时,残余非均匀性会增加。如图 3(b)中,在低于 20 °C 或高于 50 °C 的工作点,非均匀性增加。因此通常在应用中要求标定温度覆盖应用场景的温度范围。

辐射特征包括辐射亮度和光谱分布两个方面。即使标定温度覆盖了应用场景的范围,但如果场景的辐射光谱分布与黑体存在差异,仍可能出现较严重的残余非均匀性,将该现象定义为红外成像系统的响应光谱非均匀性,产生原因有两方面:一方面是红外探测器属于量子型器件,量子效率与光谱有关;另一方面是工作场景的辐射按光谱的分布与标定源差异较大。

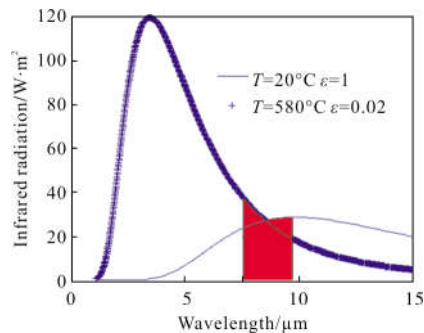
2.1 场景红外辐射特性

以灰体模型表征场景的红外辐射特征,温度和发射率作为辐射特性的表征参数,如公式(6)所示。

$$M_{\lambda} = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (6)$$

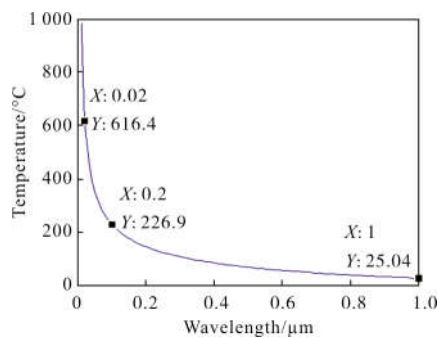
温度和发射率决定了辐射强度和光谱分布形式,温度、发射率不同的两个物体,可能会具有相同的辐射强度。如图 4(a)所示,是温度为 20 °C、发射率为 1 和温度 580 °C、发射率为 0.02 的两个物体的辐射曲线,两者具有相同的辐射出射度;在图 4(b)中,曲线的发射率,为 0.01~1,对应每个发射率存在唯一的温度,使得每个灰度的辐射亮度均与 25°C 的黑体相同。

地物背景中,常见物体的发射率,土壤、水面和



(a) 辐射光谱分布特征

(a) Distribution characteristics of radiation



(b) 发射率-温度关系

(b) Relation between emissivity and temperature

图 4 辐射相同但光谱分布不同的辐射光谱曲线

Fig.4 Radiation spectral curves with same radiation but different spectral distribution

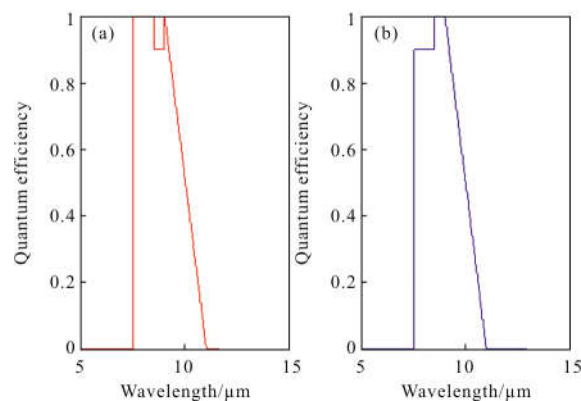


图 6 简化的响应光谱形式

Fig.6 Simplified special response form

建筑等发射率均在 0.9 以上,与黑体接近。但对于一些特殊应用场景,发射率与黑体相差较大,会出现场景的辐射亮度与黑体相当,但辐射曲线的分布形式可能与黑体有较大差异。

2.2 红外成像响应光谱特征

红外探测器光子到电荷的转换能力用量子效率表示,是波长的函数,图 5 是典型的长波红外探测器光谱响应曲线,响应曲线表现出明显的与波长相关的特征。

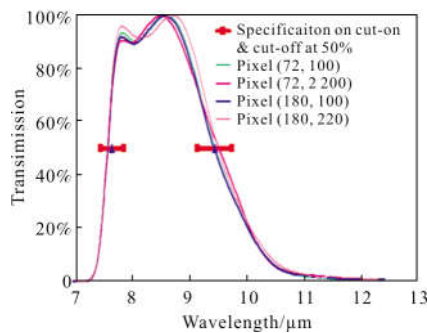


图 5 典型长波红外探测器光谱响应曲线

Fig.5 Typical spectral response curves of a long wave infrared detectors

为分析光谱非均匀性对标定校正的影响,以两个像元为研究对象,设光谱响应如图 6 所示,具体可用公式(7)表示:

$$\begin{cases} \eta_1 = 1.0 \Big|_{7.5}^{8.5} + 0.9 \Big|_{8.5}^9 + \frac{1}{2} (11 - \lambda) \Big|_9^{11} \\ \eta_2 = 0.9 \Big|_{7.5}^{8.5} + 1.0 \Big|_{8.5}^9 + \frac{1}{2} (11 - \lambda) \Big|_9^{10} \end{cases} \quad (7)$$

将两个像元的量子效率代入模型(公式(1))中,面对 0~80 °C 的黑体辐射,模拟得到两个像元的输出电荷 $1.5 \times 10^7 \sim 6 \times 10^7$,非均匀性 1.1% 左右。选择 20、30 °C 为校正点,进行两点校正,生成校正参数。校正后面对黑体,在 0~80 °C 范围内非均匀性优于 0.08%,如图 7 所示。

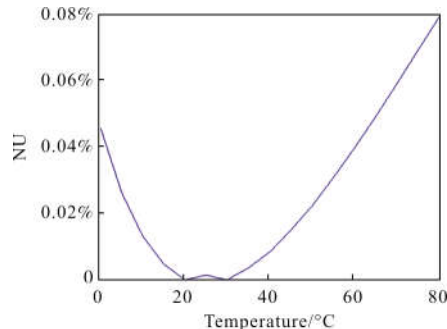


图 7 两点标定后面对黑体的残余非均匀性

Fig.7 Non-uniformity of IR camera face to blackbody with two point calibration

模拟生成高温(500~1200 °C)、低发射率(0.02)的灰体辐射曲线,应用上述两个像元观察,得到响应曲线,输出电荷与黑体相当,校正前的非均匀性为 1.02%~1.18%。应用基于黑体生成的校正参数,对高温灰体进行校正,校正后的残余非均匀性为 0.78%~0.94%,如图 8 所示,校正后非均匀性没有明显改善。

面对图 4(b)描述的发射率从 0.01~1、但总辐射亮度相同的灰体模型,响应输出在 20 °C 与 30 °C 的标定点范围内。对两像元进行非均匀性校正,图 9 给出了校正后的非均匀性,发射率越接近于黑体,校正的效果越好,反之校正的效果会变差。

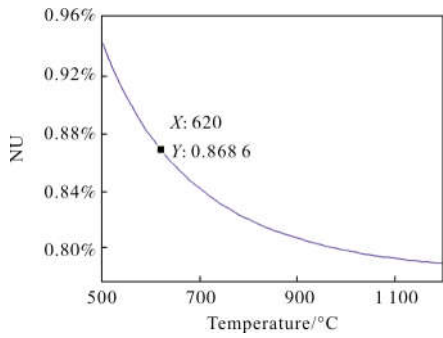


图 8 面对高温低发射灰体的非均匀性

Fig.8 Non-uniformity of IR camera face to gray objects with high temperature and low emissivity

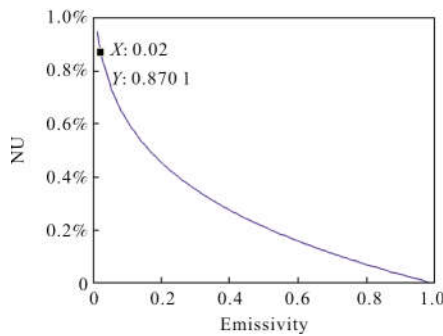


图 9 相同辐射、不同温度和发射率的响应曲线与非均匀性

Fig.9 Non-uniformity with same luminance but different temperatures and emissivities

红外探测器量子效率随光谱变化存在差异,一般对地面场景成像的应用环境,辐射特征与黑体相似,标定校正具有很好的适应性,而对于一些特殊场景时,标定校正后会存在严重的残余非均匀性。

3 响应光谱非均匀性的应用实例

响应光谱非均匀性会对红外图像产生严重影响。实际应用中,很难存在完全复合灰体模型的场景,但背景辐射可能会较灰体辐射更加复杂,导致光谱非均匀性的出现。天空背景辐射和高速飞行器的光学窗口辐射就是典型的实例。

3.1 以天空为背景的应用环境

对空中目标进行成像探测时,天空背景的辐射主要来自于大气对太阳光的散射和大气的热辐射。理想化的天空辐射可用大气散射亮度与大气辐射叠加而成。

大气散射对天空背景辐射具有较大的贡献,散射光形成的天空亮度的沿波长分布的曲线,大体上与 6 000 K 黑体的曲线相似,散射辐射光谱随太阳高

度角、大气透明系数和云量而变化。在晴空条件下,天空的散射的亮度随观测的仰角而变化,仰角增加,散射的亮度减小;散射亮度随阳光的高低角变化,阳光高度角越大,其天顶方向的辐射亮度越大。

大气的热辐射主要与水蒸气、二氧化碳和臭氧等的温度和含量有关。大气辐射受气象条件影响很大,与大气的压力、温度、湿度和视线仰角等因素有关,在地平方向,晴空大气辐射近似地可用温度为 300 K 的黑体辐射来代表。

由于大气散射曲线分布相当于太阳光谱,辐射亮度减小,相当于高温、低发射率的辐射。大气散射会对红外成像系统非均匀性产生影响。黑体标定后,观察天空中目标时,会出现残余非均匀性,如图 10 所示。残余非均匀性与观察的俯仰角度、天气情况等因素有关,与天空背景辐射特性是一致的。



(a) 黑体

(a) Blackbody



(b) Sky and ground scene

(b) 地空场景



(c) 低空场景

(c) Low altitude scene



(d) 高空场景

(d) High altitude scene

图 10 黑体标定校正后观察天地/天空背景的红外图像

Fig.10 Observe IR images of the sky and ground scenes

based on blackbody NUC



(b) 常温黑体

(b) Room blackbody

图 12 透过常温红外窗口的红外图像

Fig.12 IR images through room temperature IR window

3.2 高速飞行器应用环境

携带红外成像系统的高速飞行器，气动加热使光学窗口温度升高^[6-8]，通常可达到数百度的温度，但光学窗口的发射率较低，与黑体相差很大，可等效为高温、低发射率的灰体辐射，高温光学窗口造成了红外成像的响应光谱非均匀性，如图 11、12 所示。



(a) 自然场景

(a) Natural scenes



(b) 常温黑体

(b) Room blackbody

图 11 透过常温红外窗口的红外图像

Fig.11 IR images through room temperature window



(a) 自然场景

(a) Natural scenes

4 结 论

光谱非均匀性是红外探测器的固有属性，通过理论分析和应用实例证明了基于黑体标定校正方法无法完全适用于场景辐射特征与黑体辐射相差较大的环境条件，这是红外探测器的响应光谱非均匀性的影响。随着红外探测器应用越来越广泛，必须充分考虑到探测器的光谱响应特性，才能充分发挥探测器的性能，使系统性能达到最大化。为解决光学非均匀性的问题，需要在两方面开展工作，一方面探测器技术的进步，消除响应在光谱间的差异；另一方面是利用基于场景的非均匀性校正算法，有针对性地消除光谱非均匀性现象，需要实现快速收敛的帧间校正。光谱非均匀性的研究，在红外成像系统领域内仍处于起步阶段。这方面问题的研究，对于红外探测器的应用具有重要意义。

参考文献：

- [1] Wang Huawei, Cao Jianzhong, Ma Caiwen, et al. Design of infrared imaging system with adaptive correction function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (1): 61-66. (in Chinese)
王华伟, 曹剑中, 马彩文, 等. 具有自适应校正功能的红外成像系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 61-66.
- [2] Nie Ruijie, Li Lijuan, Wang Chaolin, et al. A combined non-uniformity correction algorithm of IR staring imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2339-2346. (in Chinese)
聂瑞杰, 李丽娟, 王朝林, 等. 一种凝视红外成像系统联合非均匀校正算法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2339-2346.
- [3] Lian Chao, Ma Tianxiang. Design of infrared imaging nonuniformity correction system based on black body

- calibration[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 365–393. (in Chinese)
- 梁超, 马天翔. 基于黑体标定的红外图像非均匀性校正系统设计[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 365–393.
- [4] Cai Sheng, Bai Xuguang, Qiao Yanfeng. Summarize on the nonuniformity correction algorithms for IRFPA based on calibration [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(10): 590–592. (in Chinese)
- 蔡盛, 柏旭光, 乔彦峰. 基于标定的 IRFPA 非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2007, 29(10): 590–592.
- [5] Li Buchan, Xiao Jun. Study of calibration -based nonuniformity correction algorithms for IRFPA [J]. *Infrared*, 2008, 27(6): 5–8. (in Chinese)
- 李步蟾, 肖峻. 基于定标的红外焦平面非均匀性校正算法研究[J]. 红外, 2008, 27(6): 5–8.
- [6] Chen Lianzhong, Zhang Jiexiang, Fei Jindong. Experiment research on the aerodynamic heating effect on the infrared imaging[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(1): 36–38. (in Chinese)
- 陈连忠, 张嫁祥, 费锦东. 气动加热对红外成像的影响试验研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 36–38.
- [7] Fan Zhigang, Yu Cuiping, Xiao Haosu, et al. Numerical simulation of thermal radiation effect about optical dome in aerodynamic thermal environment [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 649–653. (in Chinese)
- 范志刚, 于翠萍, 肖昊苏, 等. 气动光学头罩热辐射效应数值仿真研究[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 649–653.
- [8] Han Wei, Zhao Yuejin, Hu Xinqi, et al. Study on aero-optical effects of hypersonic vehicle's optical window [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(4): 622–626. (in Chinese)
- 韩炜, 赵跃进, 胡新奇, 等. 超高速飞行器光学窗口气动光学效应分析[J]. 光学技术, 2010, 36(4): 622–626.