

基于匀速扫描黑体的热像仪非均匀性校正

崔若璐, 侯德鑫, 叶树亮

(中国计量大学 工业与商贸计量技术研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要:热像仪非均匀性校正是热像仪应用的一个关键技术,常用的方法为基于黑体的热像仪非均匀性校正方法。多次成像法能解决基于黑体的方法受辐射源非均匀影响的问题,但该方法利用多幅热图的相对关系进行校正,在热图坐标下准确定位较为困难。本文基于多次成像法原理,提出了一种基于匀速扫描黑体的非均匀性校正方法,该方法结合了标定类和配准类基于场景的校正方法的优点,通过热像仪扫描读取黑体参考源,利用热像仪不同探测单元对黑体同一场景点响应的差异进行非均匀性评价。相比多次成像法,本文的方法更容易实现且具有更好的抗噪声能力。利用本文的方法对两个热像仪进行非均匀性校正,结果表明确实可以分离黑体非均匀性,但提高了对黑体辐射源和热像仪时间稳定性的要求。

关键词:红外热像仪;红外焦平面阵列;非均匀性校正;黑体

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.03.010

Non-uniformity correction of thermal imager scanning blackbody with uniform speed

CUI Ruo-lu, HOU De-xin, YE Shu-liang

(Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Non-uniformity correction of thermal imager is a key technology for thermal imager applications. The common method is a blackbody-based thermal imager non-uniformity correction method. Multiple imaging method can solve the problem that the blackbody-based method is affected by the non-uniformity of the radiation source, but the method correct the non-uniformity using the relative relationship of multiple thermal images, it is difficult to locate accurately in the thermal image coordinates. Based on the principle of multiple imaging method, a non-uniformity correction method of thermal imager scanning blackbody with uniform speed was proposed, which combines the advantages of calibration-based and registration scene-based non-uniformity correction methods. Through scanning blackbody reference source by a thermal imager, the non-uniformity was evaluated by the difference of the response of different detection units to the same scene of the blackbody. Compared with multiple imaging methods, the method in this paper is easier to achieve and has better anti-noise ability. The non-uniformities of the two thermal imagers were corrected by this method. The results show that the non-uniformity of the blackbody can be separated, but the demands about time stability of the blackbody radiation source and the thermal imager are improved.

Key words: infrared thermal imager; infrared focal plane array; non-uniformity correction; blackbody

作者简介:崔若璐,女,硕士研究生,主要从事主动热成像无损检测和热像仪特性研究。E-mail: crl1946@163.com

通讯作者:叶树亮(1973-),男,博士,教授,主要研究方向为新型传感技术及仪器信号处理。E-mail: itmt_paper@126.com

收稿日期:2017-07-07; **修订日期:**2017-08-28

1 引言

在对红外热像仪和红外焦平面阵列(IRFPA)进行非均匀性校正(NUC)时,基于黑体的非均匀性校正方法(又称标定类方法)是一种目前最常用的非均匀校正方法^[1-3]。该方法基于一个假设:实验所用的辐射源(黑体)是均匀的,即面源黑体不同位置有相同的辐射温度^[4-7]。

由于大面积的辐射源的均匀性难以保证,尤其在辐射源温度偏离环境温度较多时。为了减小黑体非均匀性对热像仪非均匀评估带来的影响,德国PTB研究机构的Gutschwager B等人提出了多次成像法^[8]:热像仪拍摄记录具有未知且空间温度分布不均匀的辐射源的一系列热图(至少三幅),后两幅图像相对于第一幅主图像进行了沿行和列的平移(至少1个像素),通过校正热像仪的增益系数得到NUC结果。这种方法的优点是它可以应用于任意空间辐射温度分布的辐射源,只需要该辐射源在测量过程的分布有足够的时间稳定性。由于准确的像素坐标位移参数难以准确获取,多次成像法在实际测试中难以操作,同时随机噪声误差会累积。

本文基于多次成像法的方法原理,提出一种更容易实现的测试方法:基于匀速扫描黑体的热像仪非均匀性校正方法。

2 原理与方法

2.1 校正系统

匀速扫描黑体的热像仪非均匀性校正系统由黑体、热像仪、二维运动平台和电脑组成。黑体和热像仪分别固定在Z轴和X轴运动平台上,使得热像仪运动方向与黑体面运动方向平行。测试时,分别启动X轴和Z轴运动平台,使得黑体分别沿着热图行方向和列方向运动经过整个成像视场。并通过上位机软件采集热像仪拍摄的原始热图像序列。

多次成像法的方法利用热图坐标下的3个热图的相对位置关系来校正热像仪的非均匀性,由于平移的单位为像素级别,准确定位困难;本文通过运动控制实现热像仪相对于黑体的相对运动,运动速度经过事先标定,速度重复性比位置重复性好。

2.2 校正算法

热像仪扫描拍摄黑体对热像仪进行非均匀性校正的思路是选择热图上的某一点作为非均匀性校正的参考点,然后通过非均匀性校正确定其他点的修正系数,该算法主要分为以下几个部分:

(1)非均匀性校正的在行(列)扫描过程中,对于黑体表面任意点 ib ,如果该点在扫描过程中运动经过热像仪某行(列)所有像素点,则该点可用于该行(列)的非均匀校正;由于扫描过程大约花费的时间为10 s左右,在该段时间内该黑体点的温度变化非常小,假设其温度不变。当黑体在热图中扫描的方向沿行方向运行,因此记热像仪中观察到该点的像素行编号为 ir ,不同列像素点观察到该黑体点的温度为 $T_{m,ib}(ir,ic)$,则有:

$$T_{m,ib}(ir,icRef) = G(ir,ic)T_{m,ib}(ir,ic) + O(ir,ic) \quad (1)$$

$T_{m,ib}(ir,icRef)$ 为第 ir 行像素点的参考点观察到黑体点 ib 的温度值。 $G(ir,ic)$ 和 $O(ir,ic)$ 分别为增益系数和偏置系数。式(1)描述的是两点校正的方法,由于本文研究的重点是匀速扫描的评价方法的特点,为了简化问题,本文仅对热像仪进行单点评估,即仅计算系统偏移系数 $O(ir,ic)$,则式(1)简化为:

$$T_{m,ib}(ir,icRef) = T_{m,ib}(ir,ic) + O(ir,ic) \quad (2)$$

(2)热图像上每个像素点的温度对于黑体表面一行 $N_{ir,ib}$ 个观测点,基于总体最小二乘法进行拟合时,拟合结果一定会经过所有参与拟合点的中心位置^[9]。因此,任意点测温修正模型一定满足:当观测目标温度为 $T_{m,ib}(ir,ic)$ 时,修正结果为 $\bar{T}_{m,p}$:

$$\bar{T}_{m,p}(ir,ic) = \frac{\sum_{ib} T_{m,ib}(ir,ic)}{N_{ir,ib}} \quad (3)$$

现将每个像素点行校正的结果表示为 $\bar{T}_{h,p}(ir,ic)$,每列校正的结果表示为 $\bar{T}_{v,p}(ir,ic)$ 。

(3)非均匀性综合评价。在某一个特定的温度下,对行列的评价结果进行综合,得到非均匀性的综合评价。将热图上所有点的测温结果与参考点进行比较,使得所有点的测温结果与参考点一致,而所有点与参考点的测温差即各个点的单点非均匀评估结果,而在表示该结果的时候,根据扫描实验,行和列之间的像素点评价所使用的黑体点是不同的,故行扫描和列扫描的结果是独立的,在描述各个点与参考点之间的差值关系的时候有两种不同的计算路径:

①单点非均匀性计算路径1:行-列-行的方式:该种计算路径的计算方式可以用如图1表示,其中虚线路径与实线路径就是点 (ir,ic) 在行-列-行的方式下到达参考点 $(irRef,icRef)$ 的两种不同路径。

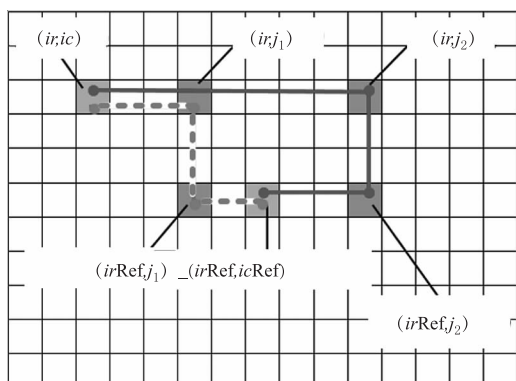


图1 行-列-行的单点非均匀性计算路径

Fig. 1 Single point non-uniformity calculation path of row-column-row

对第 j 种路径的非均匀性表达公式如下:

$$\Delta T_1(j) = \bar{T}_{h,p}(ir, ic) - \bar{T}_{h,p}(ir, j) + \bar{T}_{v,p}(ir, j) - \bar{T}_{v,p}(irRef, j) + \bar{T}_{h,p}(irRef, j) - \bar{T}_{h,p}(irRef, icRef) \quad (4)$$

由于该种评价方法每个点通过比较达到参考点的路径共有 nc 种,需要对每个参考点这 nc 种参考路径求平均:

$$\Delta \bar{T}_1 = \frac{\sum_{j=1}^{nc} \Delta T_1(j)}{nc} \quad (5)$$

② 单点非均匀性计算路径 2: 该种计算路径的计算方式可以用如图 2 表示,其中虚线路径与实线路径就是点 (ir, ic) 在行-列-行的方式下到达参考点 $(irRef, icRef)$ 的两种不同路径。

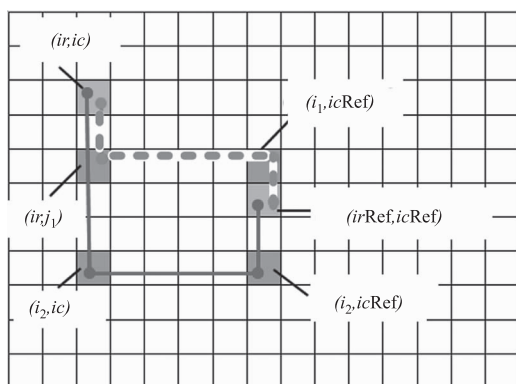


图2 列-行-列的单点非均匀性计算路径

Fig. 2 Single point non-uniformity calculation path of column-row-column

就对第 i 种路径的非均匀性表达公式如下:

$$\Delta T_2(i) = \bar{T}_{v,p}(ir, ic) - \bar{T}_{v,p}(i, ic) + \bar{T}_{h,p}(i, ic) - \bar{T}_{h,p}(i, icRef) + \bar{T}_{v,p}(i, icRef) - \bar{T}_{v,p}(irRef, icRef) \quad (6)$$

由于该种评价方法每个点通过比较达到参考点的路径共有 nr 种,需要对每个参考点这 nr 种参考路径求平均:

$$\Delta \bar{T}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{nr} \Delta T_2(i)}{nr} \quad (7)$$

经过上述两种评价方式得到每个像素点的行-列-行的评价矩阵 $\Delta \bar{T}_1$ 和列-行-列的评价矩阵 $\Delta \bar{T}_2$,将这两个评价矩阵求均值,得到的就是热像仪单点非均匀性评价矩阵 ΔT_p :

$$\Delta T_p = \frac{\Delta \bar{T}_1 + \Delta \bar{T}_2}{2} \quad (8)$$

3 噪声的影响

多次成像法通过相邻点逐点比较,建立各点与参考点关系,在此过程中随机噪声会进行多次传递。本文的方法各点只通过两个中间点建立与参考点的关系,随机噪声只进行了三次传递。基于上述理论结合仿真和实验进行分析。

3.1 匀速扫描方法的抗噪能力

3.1.1 实验装置和实验条件

实验装置设计如图 3 所示,本次实验使用的热像仪型号为 FLIR - A35 热像仪,分辨率为 320×256 ,选用帧频为 60Hz。所使用的黑体为凯尔文光电技术有限公司制造的 JQG - 300 精密黑体,有效辐射面直径为 100 mm。所使用的二维运动平台为上海镜程仪器的 X 轴和 Z 轴的运动平台。在实验中将 Z 轴和 X 轴的一维运动台固定在大理石试验台上,然后将热像仪和黑体分别固定在 Z 轴和 X 轴的一维运动台上,热像仪的镜头与黑体辐射面保持平行,通过运动控制器控制二维运动台使得热像仪相对黑体能够沿行和列方向扫描拍摄黑体辐射面,通过上位机软件采集热像仪拍摄的原始热图像序列,将其作为仿真实验的数据。

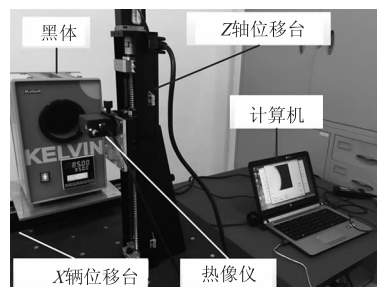


图3 实验平台装置图

Fig. 3 Photo of the experiment setup

3.1.2 噪声影响的评估

对热像仪采集的数据加上标准差为 0.1°C 的高斯白噪声,加噪声之后的 NUC 记为 $\Delta T_{p,noise}$,比较加噪声前后两次 NUC 之差见图 4,计算图 4 的均方根

如下式所示:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{ir=1}^{nr} \sum_{ic=1}^{nc} (\Delta T_p(ir, ic) - \Delta T_{p, \text{noise}}(ir, ic))^2}{nr \cdot nc}} \quad (9)$$

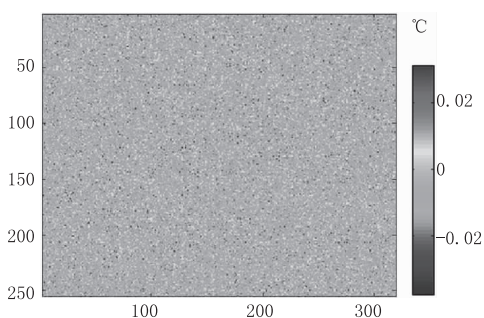


图 4 加噪声前后的 NUC 之差(256×320 矩阵)

Fig. 4 The difference between the NUC before and after the noise(256×320 matrix)

得到均方根的结果为 0.01 °C,从以上结果可以得知:匀速扫描评价非均匀性的方法的抗噪能力较好,噪声基本对 NUC 结果没有影响。

3.2 多次成像法的抗噪能力

多次成像法的论文中仅对一组 8×8 方阵进行仿真分析^[8],同样对热像仪所测温度数据加上标准差为 0.1 °C 的高斯白噪声,比较加噪声前后的 NUC 结果,计算其均方根为 0.23 °C。

从上述结果可以得到多次成像法对噪声较为敏感,加入相同标准差的白噪声之后,噪声对多次成像法的影响为原始噪声的 2.3 倍,而噪声对本文方法的影响为原始噪声的 1/10。

3.3 多次成像法的抗噪能力随矩阵规模的变化

多次成像法中使用的仿真数据为 8×8 的方阵,矩阵规模较小。现讨论不同矩阵规模下,噪声对多次成像法的评价结果的影响。随机生成范围(100, 150)°C 的辐射源辐射温度,为了减小随机性,对每个规模的矩阵进行 200 次仿真实验,求有无噪声的 NUC 之差的均值作为该热图像规模下的噪声的影响,得到最后的结果如图 5 所示。

从以上结果可知,多次成像法在评价的矩阵规模越大的时候,受噪声的影响越严重。在对 320×320 的矩阵进行分析时,加噪声前后的 NUC 之差的均方根为 0.9396 °C,噪声对其影响远大于本文的方法。说明相比于多次成像法,本文的评价方法在较

大程度上提高了抗噪声能力。

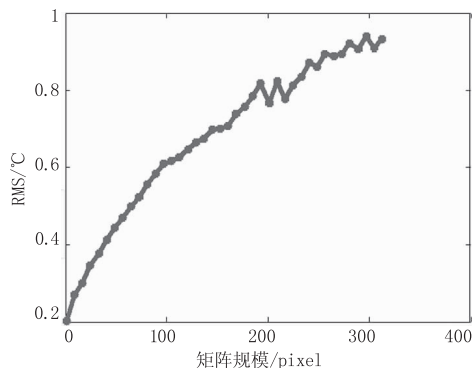


图 5 噪声的影响随矩阵规模的变化

Fig. 5 The influence of noise varies with matrix size

4 分离黑体的非均匀性

4.1 实验说明

Gutschwager B 等人^[8]仅利用一组数据进行多次成像法的 NUC,并没有对 NUC 结果进行评价。无论热像仪的非均匀性或是黑体的非均匀性都没有现成的方法对其进行评价。假设不同的热像仪的非均匀性不同,而在实验过程中黑体的非均匀性相同,本文利用两个热像仪对同一个黑体进行实验,比较不同热像仪评价得到的黑体非均匀性的相似程度。

4.2 实验条件

实验使用的两个热像仪型号为 FLIR - A35 热像仪,分别记为 A 号和 C 号,选用帧频为 60 Hz,如图 6 所示。



图 6 实验所用两个 FLIR - A35 热像仪

Fig. 6 Two FLIR-A35 thermal imagers were used in the experiment

4.3 实验结果

4.3.1 基于黑体的热像仪非均匀性校正

用基于黑体的方法评估热像仪的非均匀性时直接使用热像仪对黑体辐射面进行拍摄,要求黑体辐射面充满热像仪的视场。分别取两个热像仪行扫描

拍摄黑体过程中的中间一帧,此时热像仪正好运行到黑体辐射面的中心位置,满足黑体辐射面充满热像仪视野这个条件。得到对两个热像仪的非均匀性评价结果如图7所示。

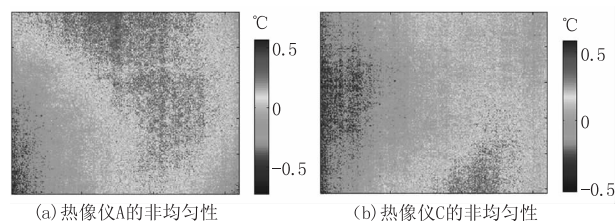


图7 基于黑体的非均匀性评价结果

Fig. 7 The results of non-uniformity evaluation based on blackbody

从图7的(a)、(b)中得到的非均匀性结果可知,同一个红外焦平面阵列的单个传感器的反馈温度之差的最大值达到 $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于该方法评价的非均匀性包括热像仪本身非均匀性和黑体表面的非均匀性,故图7显示的评价结果并不是最终的热像仪的非均匀性。

4.3.2 基于匀速扫描黑体的热像仪非均匀性校正

利用本文的匀速扫描黑体的方法对热像仪的非均匀性进行评估,综合行、列的评估结果,得到两个热像仪的非均匀性评估结果如图8所示。

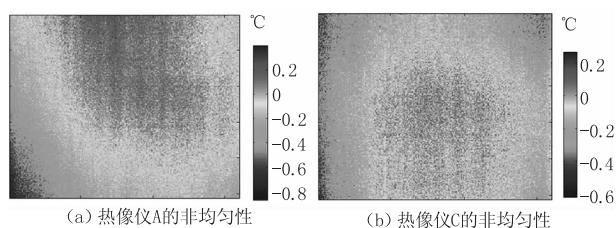


图8 匀速扫描黑体的非均匀性评价结果

Fig. 8 The results of nonuniformity evaluation of uniform scanning blackbody

从图8(a)、(b)中得到的热像仪非均匀性可知,同一个红外焦平面阵列的单个传感器的反馈温度之差的最大值达到 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,该方法理论上不受黑体表面分布非均匀性影响。

4.3.3 两个热像仪评估的黑体表面分布的非均匀性

由于基于黑体的方法评价的热像仪非均匀性无法分离热像仪自身的非均匀性与黑体表面分布的非均匀性。若本文的方法得到的热像仪的非均匀性的确不受黑体表面非均匀性的影响,将两种方法的评价结果做差,所得到的结果即为黑体表面的非均匀性。若使用不同热像仪得到的结果相似,则说明假

设正确。

计算图7和图8的热图的非均匀性之差,得到的结果如图9所示,图9(a)和图9(b)分别是热像仪拍摄的黑体表面的非均匀性,两者呈现出相似的温度分布。证明基于匀速扫描的方法可以分离黑体的空间分布非均匀性。

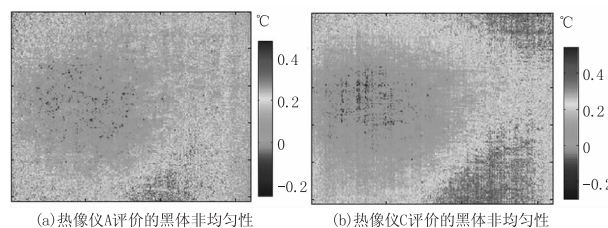


图9 不同热像仪对黑体辐射面的非均匀性评估结果

Fig. 9 Evaluation of non-uniformity of blackbody radiating surface by different thermal imager

4.3.4 两个热像仪评估的黑体非均匀性之差

虽然两个热像仪实验得到的黑体的非均匀性分布类似,但是为了进一步证明基于匀速扫描的方法能分离黑体非均匀,现对上述两个不同的热像仪评估的黑体非均匀性做差,即将图9的(a)和(b)相减得到图10。

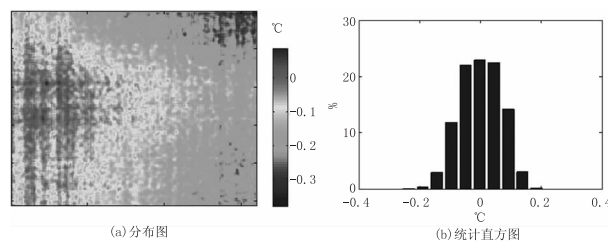


图10 两个热像仪评估的黑体非均匀性之差

Fig. 10 The difference between the blackbody non-uniformity Evaluated by the two thermal imagers

求得图10的均方根结果为 $0.0666\text{ }^{\circ}\text{C}$,小于图9中评价得到的黑体的非均匀 $0.0819\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.1164\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同热像仪评价得到的黑体的非均匀性分布类似,但是在某些区域有差异。其差异的主要原因有以下二点:

(1) 黑体的稳定性在对两个热像仪做实验的过程中发生了变化;

(2) 热像仪的稳定性在一次实验的扫描过程中发生了变化。

5 结论

本文提出一种基于运动参数(而非位移参数)

扫描的热像仪非均匀性评价方法,仿真结果表明该方法抗噪声干扰能力有提高,通过对两个热像仪进行实验,成功分离黑体非均匀性的影响,在实验过程中发现黑体稳定性和热像仪稳定性对测试结果有重要影响,因此该方法降低了对黑体均匀性要求,但是提高了对黑体稳定性要求。

参考文献:

- [1] LIU Huitong, YI Xinjian. Two-point nonuniformity correction for IRFPA and its physical motivation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(1): 76-78. (in Chinese)
刘会通, 易新建. 红外焦平面阵列非均匀性的两点校正及依据[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 76-78.
- [2] NI Yunlong, HAO Qiulai, YU Fandi. Non-uniformity correction for infrared image with large field of view[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(3): 344-347. (in Chinese)
倪云龙, 郝秋来, 于繁迪. 一种基于大视场红外图像的非均匀性校正算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(3): 344-347.
- [3] LI Yanxu, SUN Dexin, LIU Yinnian. Polynomial fitting based on nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(2): 104-107. (in Chinese)
李言旭, 孙德新, 刘银年. 基于多项式拟合的红外焦平面非均匀性校正[J]. 激光与红外, 2005, 35(2): 104-107.
- [4] Krupiński M, Firmanty K, Kastek M. Test stand for non-uniformity correction of microbolometer focal plane arrays used in thermal cameras [J]. Proc. SPIE, 2013, 8896: 889611.
- [5] LIU Huitong, YI Xinjian, LIU Jingl, et al. Limitations of blackbody-based nonuniformity correction for IRFPA[J]. Infrared Technology, 2003, 25(3): 41-44. (in Chinese)
刘会通, 易新建, 等. 红外焦平面阵列基于黑体的非均匀性校正方法中的限制因素[J]. 红外技术, 2003, 25(3): 41-44.
- [6] ZHANG Xiaolong, LIU Ying, WANG Jian. Infrared thermometry technology with different nonuniformity correction temperatures[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 150-155. (in Chinese)
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.
- [7] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guohua. Nonuniformity correction based on unified photoresponse characteristics of infrared focal plane arrays [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(6): 926-932. (in Chinese)
左超, 陈钱, 顾国华. 基于焦平面归一化响应特性的红外非均匀性校正[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 926-932.
- [8] Gutschwager B, Hollandt J. Nonuniformity correction of infrared cameras by reading radiance temperatures with a spatially nonhomogeneous radiation source [J]. Measurement Science & Technology, 2016, 28(1): 015401.
- [9] ZHANG Xianda. Matrix analysis and application [M]. Beijing: The Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.