

文章编号:1001-9014(2007)01-0056-05

基于校正率的红外焦平面阵列非均匀性校正评估新方法

汪民, 沈伟, 陈彬

(中山大学信息科学与技术学院 电子与通信工程系, 广东 广州 510275)

摘要:提出一种新的能对非均匀性校正效果进行定量计算的评估测度“校正率”,并进行了实验验证.校正率以时域噪声为参考标准来衡量图像非均匀特性,不仅可以反映图像显示效果,还可以反映图像测温精度.该方法可用于IRFPA系统的性能评价和非均匀性校正方法校正效果评价,对非均匀性校正的研究具有重要意义.

关键词:红外焦平面阵列;非均匀性校正;校正率;非均匀性特性

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

NEW EVALUATION METHOD BASED ON CORRECTION-RATE FOR NON-UNIFORMITY CORRECTION OF IRFPA

WANG Min, SHEN Wei, CHEN Bin

(Department of Electronics and Communication Engineering, School of Information Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A new evaluation method, Correction-Rate, was proposed, which can quantitatively compute the effect of NUC, and some experiments were performed to verify its advantages. Correction-Rate uses the temporal noise as a reference standard to evaluate NU of the infrared images. It can not only reflect the display effect, but also the temperature-measuring precision. This measurement can be used in comparison of the performances of IRFPA system and evaluation of the effects of NUC methods. It is very meaningful for the further research of NUC.

Key words: infrared focal plane array (IRFPA); non-uniformity correction; correct-rate; non-uniformity characteristics

引言

随着红外探测技术的发展,焦平面阵列(FPA)在红外热成像系统中得到了广泛的应用,和以往的红外探测技术相比具有频带宽、反应快、结构紧凑等一系列优点,给日常生产、生活带来了极大的方便.但由于像元数目众多,IRFPA各探测元在同一均匀入射辐射下,有不同的输出响应,即非均匀性,严重影响了成像质量,因此必须进行非均匀性校正^[1].

目前的非均匀性定义较注重图像显示特性,传统的非均匀性校正方法也主要针对图像显示效果进行,而较多新的应用领域(如电力设备过热故障诊断、医学红外图像诊断等)要求非均匀性校正方法既要注重图像的显示效果,又要达到较高的测温精度,这就对非均匀性校正方法及其校正效果评价提

出了新的要求.

在完整的红外图像非均匀性产生机理与分析理论确立以前,实际测量是目前人们分析红外图像非均匀性的一种有效手段.通常的非均匀性测试使用标准均匀温度面辐射源(大孔面黑体),通过比较焦平面探测器的输入输出图像,获得对研究对象(被测量器件、系统或算法)的认识.

下文先讨论现有的非均匀性评估方法,在其基础上提出新的评估测度“校正率”,并通过实验来验证这种评估方法的合理性.

1 现有评估方法分析

目前还没有一个国际统一的非均匀性定义和度量方法,不同的定义侧重点不同,往往只反映出某一方面的特性或比较适合系统的某些指标要求^[1].

收稿日期:2006-04-30,修回日期:2006-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60473109)

作者简介:汪民(1968-),男,安徽凤阳人,中山大学博士研究生,主要研究方向:红外图像处理,红外图像故障诊断.

Received date: 2006-04-30, revised date: 2006-11-30

式(1)为中华人民共和国国家标准《红外焦平面阵列特性参数测试技术规范》中的关于非均匀性(NU)的定义^[2]. 其定义红外焦平面阵列的非均匀性为在均匀入射辐射下,焦平面阵列像元输出值的均方误差与输出平均值的百分比.

$$NU = \frac{1}{V_{avg}} \sqrt{\frac{1}{N \times M - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_{avg})^2}, \quad (1)$$

$$\text{其中 } V_{avg} = \frac{1}{N \times M - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij}$$

式中 V_{ij} 为焦平面上第 i 行第 j 列所对应像元的输出值, V_{avg} 为焦平面上所有有效像元的图像平均值(均不包括无效像元的输出值,无效像元包含死像元和过热像元), M 和 N 分别为行数和列数, d 为死像元数, h 为过热像元数(死像元和过热像元的判定标准见参考文献[2]).

以上方法较一般资料的定义增加了有效探测元的概念,从而提高了评价标准的整体可靠性与科学性,有效地去除了奇异点的影响. 作为产品的出厂指标,该标准的评估结果具备极高的参考价值. 该评估方法计算结果和 V_{avg} 成反比,对系统增益敏感.

国外很多文献[3]用 MSE 均方差(Mean Square Error 或 Mean Deviation)来衡量图像非均匀性大小.

$$MSE = \frac{1}{NM} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\hat{Z}_{ij} - Z_{ij})^2, \quad (2)$$

式中 Z_{ij} 和 \hat{Z}_{ij} 分别是像点期望值和估计值. 自然场景下的红外图像理想值无法在实用中得到,所以上式一般用于图像非均匀性校正仿真过程中迭加非均匀噪声的红外图像校正后的图像非均匀性评价,或者用于在实验室使用黑体辐射源对红外热成像系统进行非均匀性评价.

也有文献[4]使用根方差(Root Mean Square Error)或标准差(Standard Deviation)以及伪信噪比(Pseudo Signal To Noise Ratio)进行非均匀性比较.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\hat{I}_{ij} - I_{ij})^2}, \quad (3)$$

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{2^b}{RMSE} \right), \quad (4)$$

这里 b 是每个像素点数据位数. I_{ij} 和 \hat{I}_{ij} 分别是像点输出值和校正值.

这里可以注意到:均方差只反映待评估图像与原图的不一致程度,未能反映非均匀性校正算法在图像非均匀性方面的改进是否达到较为理想的状态,即校正程度.

Werner Gross 在文[5]中使用非均匀性噪声和

时域噪声之比“ c ”来衡量红外图像非均匀性大小,具体做法是:在黑体温度 T_B 下, K 帧图像,图像大小 $N \times M$, 则:

$$\sigma_{in,i}^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{j=1}^K (I_{i,j} - \langle I_i \rangle)^2, \quad (5)$$

其中 $\langle I_i \rangle = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K I_{i,j}$, 式中 i 代表黑体温度 T_{BB}

下记录的 K 帧图像序列中的第 i 帧.

$$\sigma_{in}^2 = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^{N \times M} \sigma_{in,i}^2, \quad (6)$$

σ_{in} 代表黑体温度 T_{BB} 下的时域噪声(各像素时域噪声均方根),则计算非均匀性校正能力 c (non-uniformity correct-ability) 计算如下:

$$c = \sqrt{\frac{\sigma_{total}^2}{\sigma_{in}^2} - 1}, \quad (7)$$

式中 σ_{total} 是时域噪声和空域噪声的总和,计算方法如下:

$$\sigma_{total}^2 = \frac{1}{N \times M - 1} \sum_{i=1}^{N \times M} (x_i - \langle x \rangle)^2, \quad (8)$$

其中 $\langle x \rangle = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^{N \times M} x_i$, 式中 x_i 代表黑体温度 T_{BB}

下记录某帧图像的第 i 像素点图像值.

应用以上几种计算方法来评价非均匀性校正算法的校正效果时,都能定量计算图像非均匀性校正效果,即图像显示特性的校正效果,但对强调图像测温精度的应用中,不能把非均匀性校正效果和图像测温精度联系起来,未能反映图像测温精度的校正程度.

2 新的评估方法及实验验证

2.1 时域噪声特性

红外热成像系统输出的时域噪声符合高斯分布,IRFPA 非均匀性校正的目标是将空间固有噪声减低到时域瞬态噪声的水平^[5].

本文实验使用非制冷焦平面红外热成像装置:KDM2000CCM,探测器为非致冷焦平面 320×240 . 实验中因黑体辐射面不能覆盖全部图像,故计算时实际使用图像中心 160×160 像元进行.

为保证实验中时域噪声的准确测量,本文实验中,在同一黑体温度点记录 10 帧图像. 将各像素点的时域噪声根据式(5)计算,噪声表现如图 1(左). 整幅图像时域噪声分布直方图见图 1(右),经计算分析得知其分布符合高斯分布.

根据式(6)计算得到在黑体温度 T_{BB} 下整幅图

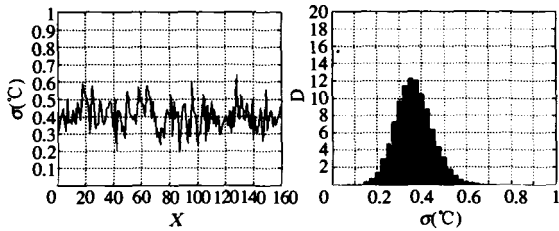


图1 图像行时域噪声曲线和时域噪声分布直方图
Fig.1 The line temporal noise curve of the image and the distribution histogram of the temporal noise

像时域噪声见表1。从表1中时域噪声随目标黑体温度变化可以发现,时域噪声基本不随目标温度变化而变化。

表1 时域噪声随黑体温度变化

Table 1 The temporal noise varies with the blackbody temperatures

目标黑体温度(℃)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
原始图像输出时域噪声(bit)	7.05	5.91	5.91	5.95	6.29	6.81	6.09	6.33	6.62	6.95
两点法校正后噪声温度(℃)	0.35	0.29	0.29	0.30	0.31	0.34	0.30	0.31	0.33	0.34
二次曲线法校正后噪声温度(℃)	0.42	0.35	0.34	0.32	0.33	0.34	0.29	0.28	0.28	0.28

2.2 校正率的定义

为便于评价图像非均匀性校正效果,我们使用“校正率”的概念,其定义为图像时域噪声与图像差异之比。图像差异为各像素当前值与期望值的根方差。

$$C_R = \frac{\sigma_m}{RMSE}, \quad (9)$$

式中 C_R 代表“校正率”; σ_m 代表图像的时域噪声,其计算方法如下:

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^{N-M} \sigma_{m,i}^2, \quad (10)$$

$$\sigma_{m,i}^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{j=1}^K (I_{i,j} - \langle I_i \rangle)^2, \quad (11)$$

$$\langle I_i \rangle = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K I_{i,j}, \quad (12)$$

式中 N 为图像总像元数, M 为无效像元数; i 代表黑体温度 T_{BB} 下记录的 K 帧图像序列中的第 i 帧。

定义中 $RMSE$ 代表所有噪声和,其计算公式如下:

$$RMSE^2 = \frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^{N-M} (x_i - \langle x \rangle)^2, \quad (13)$$

式中 x_i 代表图像第 i 个有效像元图像值; 式中 $\langle x \rangle$ 应根据不同应用选择不同计算方法:

- 针对强调显示的应用(显示校正率), $\langle x \rangle$ 为

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^{N-M} x_i$$

- 针对强调精度的应用(精度校正率), $\langle x \rangle$ 代表黑体温度 T_{BB} 对应的各有效像元图像值。

以上校正率定义的重点是: 将时域噪声作为图像校正程度的衡量标准; 用图像时域噪声和图像所有噪声(空域噪声+时域噪声)之比 C_R 来反映图像非均匀性的校正水平。

而时域噪声 σ_m 代表非均匀性校正的极限水平。RMSE 能反映非均匀性水平, 但取值范围不确定, “校正率 C_R ” 的定义中使用 σ_m 来对 RMSE 进行归一化, 所以 $0 < C_R < 1$ 。 C_R 越接近 1, 代表图像校正效果越好; C_R 越接近 0, 代表图像校正效果越差。

定义中采用滤除无效像元的方法解决无效像元对校正率计算结果影响较大的问题。

2.3 校正率的实验验证

下文对校正率的应用进行实验验证。实验中, 为更好地反映校正后图像的测温精度, 各种校正方法都将图像各像素点的图像灰度输出值, 直接校正到温度值(℃)。

实验中使用的校正方法有两点法、多点法、线性拟合法、二次曲线拟合法 4 种^[6,7], 其算式如下:

$$\text{两点法: } T(i,j) = P_1(i,j)X + P_0(i,j)$$

多点法: 算式同两点法, 分段计算

$$\text{线性拟合法: } T(i,j) = P_1(i,j)X + P_0(i,j)$$

$$\text{二次曲线拟合法: } T(i,j) = P_2(i,j)X^2 + P_1(i,j)X + P_0(i,j)$$

在黑体温度 40 ~ 130℃ 间每隔 10℃ 记录一组图像(每个温度点 10 帧), 每组图像平均后用于计算系统校正参数 P_0 、 P_1 和 P_2 。校正参数的计算方法这里不在详述。得到校正参数后, 使用另外一组实验数据(45 ~ 90℃ 间每隔 5℃ 记录一组图像), 对校正效果进行评价。

图 2 是对评价图像采用多点法校正前后的输出温度抽样点曲线。曲线显示, 校正后图像非均匀性明

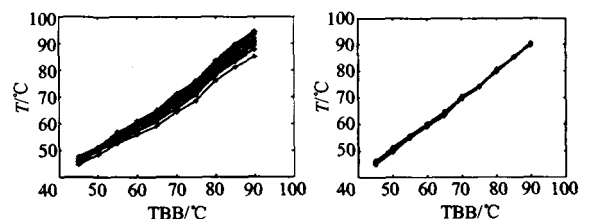


图2 图像校正前和多点法校正后 16 个抽样点输出
Fig.2 The outputs of 16 samples of the images before and after correction by multipoint method

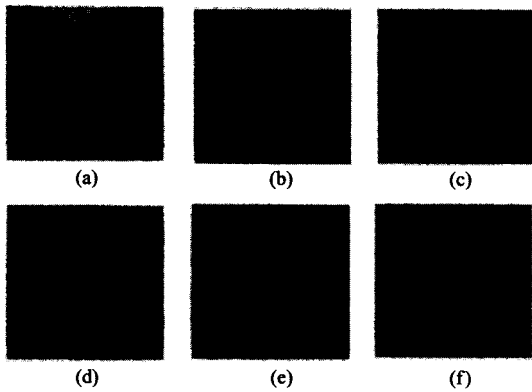


图3 实验中的红外图像非均匀性 (a)原始图像 (b)期望图像 (c)两点法 (d)多点法(10点) (e)线性拟合法 (f)二次曲线法
Fig.3 NU of the infrared images in Experiments (a) the original image (b) the desired image (c) two-point correction (d) multipoint correction(10 points) (e) linear fit (f) quadratic fit

显降低,但仍存在一定程度的残余.

图3给出了80℃黑体的原始图像、期望图像和各种方法校正后的图像.其中图(a)显示范围70~90℃、其他图像显示范围77~83℃.从图中看出,不同方法校正后的图像整体灰度差异较大,说明图像校正后测温精度差异较大;表2的计算结果也显示,两点法、多点法(5点)、多点法(10点)、线性拟合法、二次曲线法校正后的“精度校正率”分别为0.2、0.37、0.58、0.17和0.30,最大值和最小值差别达3倍,差别较明显.

根据图3校正后图像灰度和期望图像的接近程度判断,多点法(10点)校正精度最好,即精度校正率最好.这和表2中的计算结果也是吻合的.

图3不同方法校正后的图像均匀性差异对比并不明显,表2的数据显示,两点法、多点法(5点)、多点法(10点)、线性拟合法、二次曲线法校正后的“显示校正率”分别达到0.72、0.77、0.77、0.89和0.88,都相当接近,最大值和最小值差异只有20%.

有关数据计算结果见下表2.

表2数据计算时, NU_RMSE 是使用图像平均值

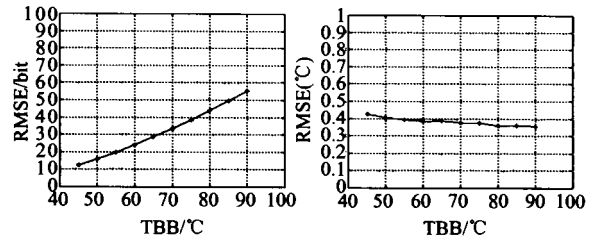


图4 图像校正前和二次曲线法校正后 NU_RMSE 特性
Fig.4 The NU_RMSE performances of images before and after correction by conic method

V_{avg} 计算的图像各像素的均方差,图4是二次曲线法校正前后的 NU_RMSE 特性. $NU = NU_RMSE/V_{avg}$, 计算时假设0℃时图像输出为0,图像平均值 V_{avg} 和图像各像素输出值均根据该假设计算.

从实验数据可以看出:

1) 国标[3]定义的非均匀性 NU 大小随增益变化而变化,且其大小和图像精度无关. NU_RMSE 能反映非均匀性大小.实验中几种校正方法均能将非均匀性(NU_RMSE)校正到接近时域噪声水平.

2) 图像精度反映图像值和图像期望值的差异,和非均匀性(NU_RMSE)没有必然关系.

3) 根据校正率分析,在注重显示的应用中,线性拟合法和二次曲线法校正效果最好,校正率分别达到0.89和0.88,已非常接近1,图像显示效果校正接近校正极限水平.

4) 根据校正率分析,多点法校正精度最好,且校正点越多,校正水平越好,越能将图像精度校正到接近时域噪声水平.可推广到校正点无穷多时,校正精度可无限接近时域噪声水平.

2.4 分析

对于不同的应用和校正方法,“校正率”都可以较好地反映图像非均匀性校正水平和图像校正精度,可以作为非均匀性校正的评价测度之一.

非制冷焦平面红外热成像系统输出图像往往存在较大的漂移(温度漂移等),时域噪声也会受环境影响发生变化,所以校正率也会随环境变化而变化,

表2 几种非均匀性校正方法校正效果比较
Table 2 Comparison of the effects of several NUC methods

	原始图像	两点法	多点法(5点)	多点法(10点)	线性拟合法	二次曲线法
$NU_RMSE(^\circ C)$	1.72	0.42	0.44	0.44	0.35	0.38
非均匀性 NU	2.44	0.73	0.71	0.71	0.58	0.99
时域噪声($^\circ C$)	0.34	0.30	0.34	0.34	0.31	0.34
精度($^\circ C$)	2.09	1.55	0.92	0.58	1.77	1.14
显示校正率	0.19	0.72	0.77	0.77	0.89	0.88
精度校正率	0.16	0.20	0.37	0.58	0.17	0.30

其变化规律需进一步深入研究.

使用校正率作为非均匀性校正评价测度时,只能在均匀辐射背景条件下,或在知道目标图像期望值的情况下使用,而对于目标红外辐射特性不确定和灰度层次丰富的自然场景图像,获得目标图像期望值困难,因此该方法在红外热成像系统正常使用状态下如何应用的问题须进一步研究.

3 小结

当前的红外热成像应用,一个方向是侧重于成像清晰,另一个方向是侧重于测量精确.因此仅要求 IRFPA 输出图像均匀是不够的,也要达到一定程度的准确. IRFPA 非均匀性校正的目标为将图像的空间固有噪声减低到时域瞬态噪声的水平.

本文回顾了国内外 NU 的定义和计算方法,不同的 NU 计算方法适合于不同的应用.在红外图像非均匀性校正效果评价时,必须对非均匀性校正效果进行定量的计算;国标的计算方法比较适合于注重图像显示的红外热成像系统,而国外的 $RMSE$ 的计算方法可以反映图像校正精度,却未能反映非均匀性校正算法在图像非均匀性方面的改进程度,即校正程度.由此本文提出用“校正率”来衡量非均匀性校正程度.

校正率的定义实质是时域噪声和图像所有噪声(空域噪声+时域噪声)之比; $0 < C_R < 1$, C_R 越接近 1 代表图像非均匀性校正效果越好,或图像校正后精确性越高;越接近 0 代表图像非均匀性校正效果越差,或图像校正后精确性越低;必须根据不同应用侧重点选择不同计算方法.定义中也考虑了无效像

~~~~~

(上接 51 页)

- [4] CHANG Hong-Hua, ZHANG Jian-Qi, Li Yong. Modification of the background clutter on classical human-eye target acquisition performance model [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (常洪花,张建奇,李勇.背景杂波对经典人眼目标获取性能模型的修正. *红外与毫米波学报*), 2005, **24** (6): 450—454.
- [5] Jain A K, Farrokhnia F. Unsupervised texture segmentation using Gabor filters [J]. *Pattern Recognition*, 1991, **24** (12): 1167—1186.
- [6] Knierim J J, van Essen C. Neuronal responses to static texture patterns in area V1 of the alert macaque monkeys [J].

元率(BP)对计算结果影响较大的问题,可采用滤除无效像元的方法去除其影响.

文中对校正率的应用进行了实验验证,实验中校正率能较好地地区别不同校正算法的校正效果,对研究非均匀性校正算法具有很好的实际意义.

### REFERENCES

- [1] Scribner D A, Kruer M R, Killiany J M. Infrared focal plane array technology [A], *Proc. IEEE*, 1991, **79**: 66—85.
- [2] GB/T 17444 1998. The technical norms for measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays [S]. (GB/T 17444 1998. 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范).
- [3] Torres S N, Pezoa J E, Hayat M M. Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays by the method of the inverse covariance form [J], *Applied Optics*, Oct. 2003, **42** (29): 5872—5881.
- [4] Sergio N Torres, Esteban M Vera, Rodrigo A, et al., Adaptive scene-based non-uniformity correction method for infrared-focal plane arrays [J], *Proc. of SPIE*, 2003, **5076**: 130—139.
- [5] Werner Gross, Thomas H, Max S. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38** (5): 862—869.
- [6] FENG Lin, LIU Shuang, ZHAO Kai-Sheng, et al. Method of nonuniformity correction for IRFPA with nonlinear response [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (冯林,刘爽,赵凯生,等.考虑红外焦平面器件非线性响应的一种非均匀性校正方法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25** (3): 221—224.
- [7] WU Jian-Fei, LI Fang-Ming, ZHUANG Liang, et al. Study on IRFPA nonuniformity correction in dim target detection system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴健飞,李范鸣,庄良,等.弱目标检测系统中红外焦平面阵列非均匀性校正算法的研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**: 372—376.
- J. Neurophysiol.*, 1992, **67** (4): 961—980.
- [7] Kapadia M K, Westheimer G, Gilbert C D. Spatial distribution of contextual interactions in primary visual cortex and in visual perception [J]. *J. Neurophysiol.*, 2000, **84** (4): 2048—2062.
- [8] Canny J F. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 1986, **8** (6): 679—698.
- [9] Martin D R, Fowlkes C C, Malik J. Learning to detect natural image boundaries using local brightness, color, and texture cues [J]. *IEEE Trans. PAMI*, 2004, **26** (5): 530—549.