

环境温度补偿的红外焦平面阵列非均匀性校正

屈惠明, 陈 钱

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 由于非制冷红外焦平面阵列的非均匀性随使用环境温度的变化漂移, 校正参数需要经常更新。针对非制冷红外焦平面阵列非均匀这一特点和定标校正的不足, 应用红外焦平面阵列二元非线性的非均匀性理论模型, 提出了环境温度补偿的非均匀性校正, 该方法既考虑了在大动态范围目标温度探测器响应的非线性, 又考虑了使用环境温度变化对非均匀性的影响, 从而进行了目标辐射温度非线性非均匀校正和对环境温度漂移的补偿, 详细介绍了该校正技术的实施程序。比较了几种校正方法的校正效果, 定量测试结果表明, 该方法可达到 0.017% 的校正后残留非均匀性, 提高了校正精度; 实时成像显示, 该校正技术改善了红外成像的图像质量, 扩大了校正技术的适用范围。

关键词: 红外成像; 二元非线性模型; 非均匀性校正; 环境温度补偿

中图分类号: TN219 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2011)12-2328-05

Surrounding temperature compensation for infrared focal plane arrays non-uniformity correction

Qu Huiming, Chen Qian

(School of Electronic Engineering and Optoelectronics Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Due to the non-uniformity of uncooled infrared focal plane arrays (IRFPA) shifting along with the variation of the application surrounding temperature, correction parameter must be updated frequently otherwise the correction quality would be degraded. Based on binary nonlinear non-uniformity theory model, a novel non-uniformity correction method considering surrounding temperature compensation was proposed. The implement procedure was described in detail. This approach takes into account both the responsive nonlinearity under the large dynamic range and the influence of surrounding temperature changes for non-uniformity. Quantitative test and comparison were performed among several correction technologies. Experimental test results show that the remainder non-uniformity corrected by proposal algorithm is less than 0.017%. This technique reduces the correction error largely. Real-time imaging indicates this method improve the image quality clearly. Furthermore, extends the application range of non-uniformity correction technology.

Key words: infrared thermal imaging; binary nonlinear model; non-uniformity correction (NUC); surrounding temperature compensation (STC)

收稿日期: 2011-04-09; 修订日期: 2011-05-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (61171164); 装备预研基金 (62201050103)

作者简介: 屈惠明 (1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电成像与探测方面的研究工作。Email: huimingqu@163.com

0 引言

军事和民用领域都迫切需求红外成像技术,这其中,红外焦平面阵列的发展功不可没,而红外焦平面阵列固有的非均匀性成为成像处理电子学的一大难题,因此非均匀性校正技术是红外焦平面阵列成像处理中必不可少的预处理技术。可以说没有非均匀性校正就不可能得到清晰的红外成像^[1-3]。目前研究的各种非均匀校正方法各有优劣:一点校正法和二点校正法具有算法简单、定标方便、运算量小的优点,但在目标温度动态范围较大时由于响应的非线性^[4],或在复杂应用环境下,校正效果不理想;而多点校正算法虽然精度较高,但运算量大,因此在工程应用上还存在一些问题,它与前两种定标校正一样,随着使用场合和环境的改变需要频繁定标,稳定性差。基于场景的非均匀性校正不需对红外焦平面阵列定标,校正系数可经过学习连续更新,对探测器参数的线性和稳定性要求不高,但精度差,校正时计算量大,实时实现困难^[5-8]。现有定标校正都是建立在一元线性或分段线性的理论模型基础上的。在这一理论模型的局限下,校正精度难以提高,且非均匀性随环境温度的漂移问题用现有校正方法难以解决。文中简要介绍了二元非线性的非均匀性理论模型;详细阐述了环境温度补偿的非均匀性校正技术及实施程序;分别用定性和定量的方法评估了文中方法的校正效果及校正精度,并与常用的校正方法进行了比较分析;最后进行了总结。

1 理论模型

根据普朗克量子假设推导的普朗克辐射定律,将红外辐射功率表示为温度 T 和波长 λ 的函数:

$$P_{\lambda}=2\pi c^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT}-1} \quad (1)$$

由这一理论推导的红外焦平面阵列二元非线性的非均匀性理论模型认为探测器响应是目标红外辐射温度 T_b 和环境红外辐射温度 T_s 的多元函数。对于 $N \times M$ 像元红外焦平面阵列探测器,其二元非线性的非均匀性模型表达式为^[9]:

$$V_{ij}(T_b, T_s)=a_{ij}+\frac{b_{ij}}{1+\exp(c_{ij}-d_{ij} \times T_b)}+e_{ij} \times T_s \quad (2)$$

式中:参数 $b_{ij} > 0, d_{ij} > 0, e_{ij} > 0, 1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M$; 参数 $(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}, e_{ij})$ 代表 $N \times M$ 规模的红外焦平面阵列各像元非均匀性系数。公式(2)是一系列“S”型曲面集合。

2 环境温度补偿的校正方法

根据二元非线性理论模型,红外焦平面阵列非均匀性主要受两个因素影响,必须对目标温度和环境温度的影响都进行校正才能提高校正的精度,使校正适应于不同的场合与应用环境。

2.1 目标红外辐射对非均匀性影响的校正

当环境温度稳定时,考虑目标温度对非均匀性的影响,根据模型用公式(3)表示:

$$V_{ij}(T_b)=a_{ij}+\frac{b_{ij}}{1+\exp(c_{ij}-d_{ij} \times T_b)} \quad (3)$$

根据系数 (a_{ij}, b_{ij}) 的物理意义,测量探测器像元对均匀面源黑体响应动态范围就可以确定探测器各像元 (i, j) 的非均匀性系数 (a_{ij}, b_{ij}) 。为了简化,对公式(3)移项并求自然对数:

$$\ln\left[\frac{V_{ij}(T_b)-a_{ij}}{b_{ij}-V_{ij}(T_b)+a_{ij}}\right]=d_{ij} \times T_b-c_{ij} \quad (4)$$

令

$$V_{bij}(T_b)=\ln\left[\frac{V_{ij}(T_b)-a_{ij}}{b_{ij}-V_{ij}(T_b)+a_{ij}}\right] \quad (5)$$

将公式(4)简化为线性函数:

$$V_{bij}(T_b)=d_{ij} \times T_b-c_{ij} \quad (6)$$

测试探测器各像元对黑体温度 T_b 的响应值 $V_{ij}(T_b)$,由公式(5)、(6)求出非均匀性系数 (c_{ij}, d_{ij}) 。这样就可以确定探测器各像元对黑体温度 T_b 的响应关系 $V_{ij}(T_b)-T_b$ 。用不同的“S”型曲线来表示非线性的非均匀性响应,如图 1(a)所示。

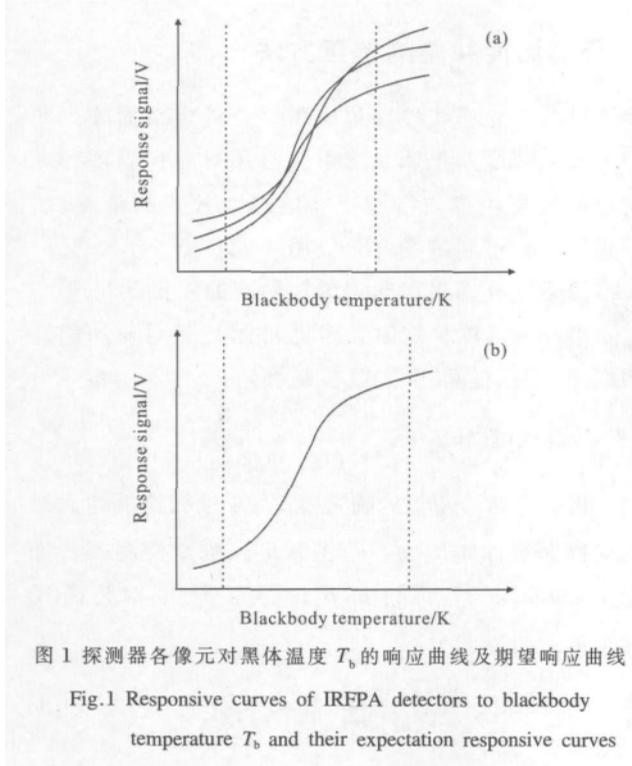
不同探测单元 (i, j) 的响应曲线参数 $(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ 取值不同。校正时,首先确定不同“S”型曲线校正期望响应曲线 S_e ,如图 1(b)所示。其期望响应函数为:

$$V_e(T_b)=a_e+\frac{b_e}{1+\exp(c_e-d_e \times T_b)} \quad (7)$$

为了将各像元响应曲线校正到期望曲线 S_e ,需知道期望曲线 S_e 的非线性系数 (a_e, b_e, c_e, d_e) 。以各像元非均匀性系数的数学期望作为其期望校正响应曲线 S_e 的系数 (a_e, b_e, c_e, d_e) ,因此有:

$$x_c = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \quad (8)$$

式中: x 取 a, b, c, d 。



建立待校正各像元响应曲线 S_{ij} 与校正期望曲线 S_c 之间的映射关系:

$$S_c = \vec{k} \times S_{ij} \quad (9)$$

式中: \vec{k} 为校正系数矩阵向量。

令

$$\vec{k} = (A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}) \quad (10)$$

由公式(8)~(10)可以得到非均匀性校正系数矩阵 $(A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij})$:

$$X_{ij} = \frac{x_c}{x_{ij}} = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \quad (11)$$

式中: x 取 a, b, c, d ; X 取 A, B, C, D 。

各像元非均匀性系数 $(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$ 是当环境温度稳定时, 测试探测器对不同温度黑体响应计算得到的。系数矩阵 $(A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij})$ 用于校正环境温度稳定时目标温度对非均匀性的影响。

2.2 环境红外辐射变化对非均匀性影响的补偿

当目标温度稳定时, 考虑环境辐射对探测器各

像元非均匀性影响。根据模型, 用公式(12)表示:

$$V_{ij}(T_s) = e_{ij} \times T_s \quad (12)$$

测试探测器各像元响应随环境温度的变化, 得到非均匀性系数 e_{ij} 。要补偿环境温度对非均匀性的影响, 必须将各像元的不一致响应调整到期望的响应, 设期望响应函数 L_c 为:

$$V_c(T_s) = e_c \times T_s \quad (13)$$

以各像元对环境温度响应的增益系数的数学期望作为期望响应增益系数:

$$e_c = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M e_{ij} \quad (14)$$

补偿环境温度对探测器各像元非均匀性的影响, 将公式(12)表示的各像元不一致响应 L_{ij} 校正到期望函数 L_c 。为此, 建立各像元实际响应关系 L_{ij} 到期望补偿函数关系 L_c 之间的映射:

$$L_c = \vec{E}_{ij} \times L_{ij} \quad (15)$$

式中: \vec{E}_{ij} 为补偿系数矩阵向量。由公式(12)~(15)得非均匀性环境温度补偿系数矩阵 E_{ij} :

$$E_{ij} = \frac{e_c}{e_{ij}} = \frac{1}{N \times M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M e_{ij} \quad (16)$$

式中: 系数矩阵 E_{ij} 用于补偿探测器非均匀性受环境温度变化的影响。

综上所述, 环境温度补偿的非均匀性校正分为 7 个步骤。前 6 个步骤是定标过程, 尽管计算量较大, 但它是在校正前离线进行的, 不影响实时校正速度。非均匀性校正系 $(A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}, E_{ij})$ 存于系统中; 系数 $(A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij})$ 用于校正探测器对目标辐射非线性的非均匀性; 系数 E_{ij} 用于补偿各像元非均匀性受环境温度变化的影响。成像时, 由电子学处理部件或校正软件模块调用这些校正和补偿系数, 用公式(9)和(15)进行非均匀性逐点校正与补偿。

3 实验及结果分析

为了评估校正技术, 将其与现有技术的成像视觉效果和校正精度进行比较。首先, 从成像视觉效果定性评价。实验图像是自行研制的红外热像仪采集的, 图 2 与图 3 分别为二点定标(校正点为 15 °C 和 65 °C)

在室外校正成像和环境温度补偿的非均匀性校正效果。由图 2 可知,二点校正可以校正探测器中严重的非均匀性,让目标图像显现出来,但是当定标环境与使用环境不同时,条纹噪声不能消除,影响成像图像的质量和视觉效果,因此不适合在环境变化的场合使用。比较图 2 和图 3 可知,环境温度补偿的非均匀性校正可以消除因校正环境变化导致的条纹状固定图像噪声,获得更加清晰的红外成像。



图2 二点定标室外校正图像

Fig.2 Outdoor two-point correction image



图3 环境温度补偿校正图像

Fig.3 STC-NUC image

其次,从非均匀性校正精度来定量评价。用红外成像参数测试分析系统 METS-11300 对未校正的原始红外图像、一点校正红外图像(校正点 30℃)、多点校正红外图像(校正点 20、50、80℃)和环境温度补偿的非均匀性校正图像分别进行非均匀性测试。测试目标是 10~100℃每隔 10℃一组的均匀辐射面源黑体,测试各温度均匀辐射黑体的探测器原始非均匀性和各种校正残留非均匀性。所有测试是环境温度稳定在 10℃下进行的。红外焦平面阵列探测器非均匀性和各校正残留非均匀性测试结果如表 1 所示。

表 1 几种校正技术残留非均匀性测试结果

Tab.1 Remainder non-uniformity test results of several NUC technology

Blackbody Temperature/ ℃	Original NU of IRFPA	RNU after OP-NUC	RNU after MP-NUC	RNU after STC-NUC
10	4.740%	0.251%	0.048%	0.022%
20	4.680%	0.146%	0.037%	0.023%
30	4.620%	0.068%	0.047%	0.023%
40	4.590%	0.237%	0.046%	0.024%
50	4.500%	0.430%	0.036%	0.022%
60	4.440%	0.626%	0.046%	0.021%
70	4.410%	0.839%	0.048%	0.021%
80	4.370%	1.060%	0.037%	0.021%
90	4.330%	1.270%	0.044%	0.017%
100	4.240%	1.480%	0.046%	0.019%
Average	4.492%	0.641%	0.043%	0.021%

由表可知:多点校正精度高于一点校正精度,多点校正残留非均匀性比一点校正平均低一个数量级以上;环境温度补偿的非均匀性校正精度高于一点校正和多点校正,其校正残留非均匀性只有多点校正的一半左右。一点校正只需存储一个校正系数矩阵,虽然校正精度不高,但算法简单。多点校正的校正精度较高,但其中最简单的三点校正需存储 5 个校正系数矩阵,占用硬件资源较多且校正计算复杂,虽然可适用于大动态范围目标温度下非线性响应的校正,但它同一点校正一样不适合在环境变化的场合应用,需要随使用环境改变而重新定标。环境温度补偿的非均匀性校正需要存储 5 个校正系数矩阵,虽然其校正系数的计算较复杂,但这是在校正前离线进行的,并不影响实时校正速度,而且它适用于宽动态范围和不同环境温度,其校正残留非均匀性最低可达 0.017%。目前,同类探测器最好的校正残留非均匀性达到 0.04%^[10]。为了直观比较各校正技术的特点,将测试数据以趋势图表示,如图 4 所示,图中的纵坐标为对数坐标。

可以看出,红外焦平面阵列对不同温度均匀黑体成像时,一点校正残留非均匀性曲线呈“V”字型,在定标点 30℃时,校正残留非均匀性最低,离定标点越远,残留非均匀性越大,校正精度逐步降低。多点

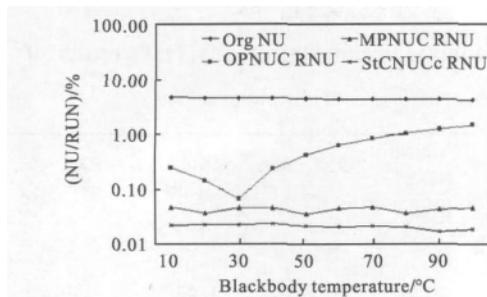


图 4 各种非均匀性校正技术残留非均匀性曲线比较
Fig.4 Comparison of remainder non-uniformity curves
of several NUC technology

校正残留非均匀性曲线也有同样的情形,在定标点 20 °C、50 °C 和 80 °C 处残留非均匀性最低,离开定标点残留非均匀性升高,只是多点校正考虑了增益校正,离开定标点的残留非均匀性增大没有一点校正明显,其残留非均匀性曲线是以各定标点为低点的多个“V”字型曲线的连线,但起伏没有一点校正大。这一结果与参考文献[11-12]中在二点线性非均匀性校正误差理论分析推导的结论相吻合。环境温度补偿的非均匀性校正残留非均匀性曲线比较平坦,各温度点校正精度差别不大,因此适用于宽场景温度范围,而且校正精度不受环境温度变化的影响。

4 结论

环境温度补偿的非均匀性校正,在考虑红外焦平面阵列响应在大动态范围的目标辐射温度下非线性性的同时,补偿了环境温度变化对探测器非均匀性的影响,解决了红外热像仪成像质量随使用环境温度变化的不足,使非均匀性校正适合应用于大动态范围和环境变化的野外场合。实验和测试表明,该校正技术可达到 0.017% 的残留非均匀性,提高了校正精度和红外成像图像质量,扩大了红外成像的适用范围和使用环境。

参考文献:

[1] Lock A, Amon F. Measurement of the nonuniformity of first responder thermal imaging cameras [C]//SPIE, 2008, 6941: 694114-1-8.

- [2] Olivier R, Stephane B, Pierre B. Non uniformity correction and thermal drift compensation of thermal infrared camera [C]//SPIE, 2004, 5405: 294-302.
- [3] Zhou H X, Lai R, Liu S Q, et al. New improved nonuniformity correction for infrared focal plane arrays [J]. *Optics Communications*, 2005, 245: 49-53.
- [4] Gao Sili, Yu Yang, Tang Xinyi. Simulation of nonlinear response of IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 770-772. (in Chinese)
高思莉, 于洋, 汤心溢. 红外焦平面阵列非线性响应仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 770-772.
- [5] Ratliff B M, Hayat M M, Hardie R C. Algebraic scene-based nonuniformity correction in focal -plane arrays [C]//SPIE, 2001, 4372: 114-124.
- [6] Shi Y, Zhang T X, Cao Z G, et al. A feasible approach for nonuniformity correction in IRFPA with nonlinear response [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46: 329-337.
- [7] Dong Liquan, Jin Weiqi, Jing Sui. Summarize on the scene-based nonuniformity correction algorithms for IRFPA [C]//SPIE, 2005, 5881: 58810P-1-10.
- [8] Lou Bo, Zhang Feng, Song Liquan, et al. Improved neural network nonuniformity correction technique for IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 300-303. (in Chinese)
楼波, 张锋, 宋利权, 等. 改进的神经网络非均匀性校正方法 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 300-303.
- [9] Qu Huiming, Chen Qian. A theoretical model on infrared focal panel arrays binary nonlinear nonuniformity [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(11): 2150-2153. (in Chinese)
屈惠明, 陈钱. 红外焦平面阵列二元非线性的非均匀性理论模型 [J]. *电子学报*, 2008, 36(11): 2150-2153.
- [10] Zhou Jinmei, Xing Tingwen, Lin Wumei. Precision analysis of nonuniformity correction of IRFPA [J]. *Acta Photo Sinica*, 2005, 34(11): 1681-1684. (in Chinese)
周金梅, 邢廷文, 林妩媚. 红外焦平面阵列非均匀性校正的精度分析 [J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1681-1684.
- [11] Abraham F, Isaac G. Nonuniformity two-point linear correction errors in infrared focal plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(4): 1251-1253.
- [12] Gurevich E, Fein A. Maintaining uniformity of IR focal plane arrays by updating offset correction coefficients [C]//SPIE, 2003, 4820: 809-820.