

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 01 - 0049 - 04

基于环境温度的红外焦平面阵列非均匀性校正

白俊奇, 陈 钱, 钱惟贤, 屈惠明, 王娴雅, 左 超

(南京理工大学 近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要:分析了环境变化对红外焦平面阵列信号输出的影响,提出了一种基于环境温度和目标温度的非均匀性校正算法.利用 UL01011 凝视型红外探测器进行信号采集,根据最小二乘原理建立了焦平面探测单元的指数响应模型.最后,利用该模型进行非均匀性校正.实验表明,算法能在较宽的环境温度范围,准确预测焦平面探测单元的响应,有效提高了非均匀性校正的精度.

关键词:红外焦平面阵列;非均匀性校正;环境温度;最小二乘

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A

NONUNIFORMITY CORRECTION FOR INFRARED FOCAL PLANE ARRAYS BASED ON ENVIRONMENTAL TEMPERATURE

BAI Jun-Qi, CHEN Qian, QIAN Wei-Xian, QU Hui-Ming, WANG Xian-Ya, ZUO Chao
(Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Environmental influence on the signal output of infrared focal plane array (RFPA) was analyzed. A nonuniformity correction (NUC) algorithm based on environmental and target temperatures was proposed. First, the original signal was captured by UL01011 staring infrared detector. Then, an exponential response model was established according to the principle of least square. Finally, nonuniformity was corrected by this model. Experimental results show that the proposed algorithm can give an exact response in a wider environmental temperature range and enhance effectively the precision of NUC.

Key words: infrared focal plane array (RFPA); nonuniformity correction (NUC); environmental temperature; least square

引言

受探测器材料、制造工艺等因素的影响,红外焦平面阵列探测单元的响应存在明显差异,这种响应的不一致定义为固定模式噪声和非均匀性(功率谱密度中的高频分量为固定模式噪声,低频分量为非均匀性),在成像时表现为不发生逐幅变化的空间噪声,通常大于时域噪声.

RFPA 非均匀性校正分为两类:辐射源标定^[1,2]法,如两点校正,该类方法假设在一定时间的间隔内,探测单元的响应特性保持不变;场景校正法,如最小均方误差法,该类方法通过场景序列的迭代估计,自适应更新校正参数.然而,因计算量大,校正后的图像存在“鬼影”等因素限制,在实时红外成像系统中的应用较少.

本文在一元线性时不变响应模型 $V_{ij}(t) = g_{ij} \times I_{ij} + o_{ij}$ (g_{ij} 是像元增益系数, o_{ij} 是像元偏移系数, V_{ij} 是响应电压信号, I_{ij} 是红外辐射)的基础上,考虑环境温度对探测器信号输出的影响,提出了一种基于环境和目标温度的非均匀性校正模型,能在较宽的环境温度范围准确预测焦平面探测单元的响应.

1 IRFPA 非均匀性响应特性

1.1 ‘S’型响应曲线

红外探测器的响应是辐射功率的单调递增函数^[3],响应强度与单元受光面积 A_D 、立体角 d 、量子效率、光谱范围和积分时间有关,表示如下式:

$$E = A_D \times d \times \eta \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, T) d\lambda \quad (1)$$

收稿日期: 2009 - 03 - 11, 修回日期: 2009 - 09 - 05

Received date: 2009 - 03 - 11, revised date: 2009 - 09 - 05

基金项目: 国防预研项目 (40405030103); 江苏省自然科学基金重点项目 (BK2008049); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 (CX08B_0452); 近程高速目标探测技术国防重点科学实验室资助

作者简介: 白俊奇 (1982-), 男, 山西翼城人, 博士生, 主要从事红外图像实时处理和红外目标探测识别等方面的研究, E-mail: baijunqi168@yahoo.cn

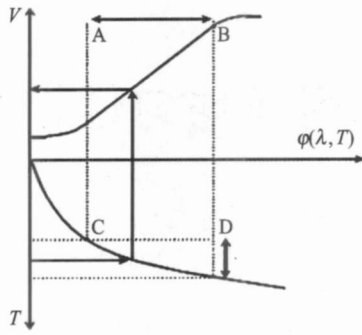


图 1 探测器信号 (V)与黑体温度 (T)的关系
Fig 1 Relation between detector signal and blackbody temperature

在较窄的动态范围内,探测器响应与辐射功率呈线性关系.然而,由于红外成像动态范围大,线性关系往往不能满足^[4-6].响应电信号、黑体温度和入射辐射能关系^[7]见图 1.

用‘S’型曲线表示探测器响应和黑体温度关系

$$V(T_b) = a + \frac{b}{1 + \exp(c - d \times T_b)} \quad (2)$$

其中, $V(T_b)$ 是响应电压, T_b 是黑体温度, a, b, c, d 是常数.由于探测元间的差异,每个探测元对应一条独立的‘S’型响应曲线.

1.2 基于环境温度的探测器响应曲线

国内红外成像系统多数使用进口探测器,如法国 ULIS 微测辐射热计、美国 BST 热电探测器等.进口探测器受工作温度限制^[8] (UL01011 型探测器工作温度 (30 ± 0.01) , BST 探测器工作温度 (22 ± 0.01)),在推荐的工作温度,RFPA 探测器成像与环境温度的关系如图 2

保持黑体温度不变,改变环境温度 T_s 为 40、30、15 和 0.待热电稳定器将 RFPA 工作温度稳定,在 $T_s = 30$ 时进行非均匀性校正 (图 2(b)),成像均匀;随 T_s 变化量 T 增加,均匀性逐渐变差,图 2(a) ($T = 10$) 出现竖条噪声和波纹;图 2(c) ($T = 15$) 竖条噪声和波纹明显;图 2(d) ($T = 30$) 竖条噪声和波纹严重.

考虑 T_s 的影响,将探测器接收的能量分为目标辐射 E_b 和环境辐射 E_s 两部分,

$$E = A_D \times d \times \sum_{i=1}^2 (\phi_b(\lambda, T_b) + \phi_s(\lambda, T_s)) \quad (3)$$

上式表明 RFPA 探测器成像不仅与目标辐射源温度 T_b 有关,还受 T_s 影响.响应电压 (V) 与 T_s (°C) 关

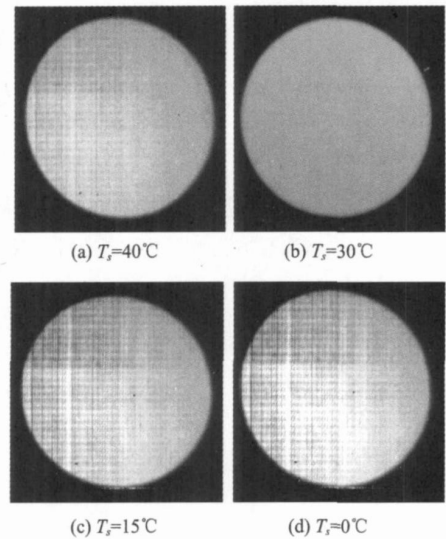


图 2 探测器成像与环境温度的关系
Fig. 2 Relation between detector imaging and environmental temperature

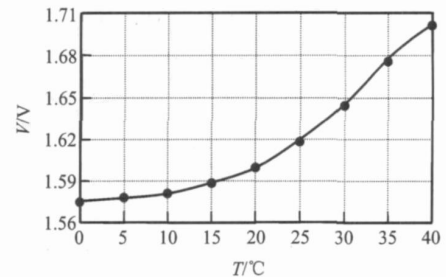


图 3 探测器响应电压和环境温度 T 的关系
Fig. 3 Relation between responsive voltage and environmental temperature

系如图 3.

黑体温度 $T_b = 40$, T_s 范围 0 ~ 40, 每隔 5 采集多帧响应信号.表 1 列出了数据 $f(x_i)$ 及对应的数值计算.受 T_s 影响,探测器输出电压变化 $V = 0.125V$,由 UL01011 型探测器的灵敏度 $4mV/K$ 可知,变化量 V 对的影响不容忽视.

利用 $f(x_i)$ 求解 $y = f(x)$,根据最小二乘原理,求 $\hat{y}(x) = span\{y_0(x), y_1(x) \dots y_n(x)\}$ 使得

表 1 探测器响应电压及数值计算

| Table 1 Responsive voltage and numerical calculation | | | | |
|--|-------|----------|--------------------|-----------|
| i | x_i | $f(x_i)$ | $Y_i = \ln f(x_i)$ | $x_i Y_i$ |
| 0 | 0 | 1.576 | 0.4548 | 0 |
| 1 | 10 | 1.580 | 0.4574 | 4.574 |
| 2 | 20 | 1.603 | 0.4719 | 9.438 |
| 3 | 30 | 1.644 | 0.4971 | 14.193 |
| 4 | 40 | 1.701 | 0.5312 | 21.248 |

$$f - \frac{*}{2} = [f(x_i) - \frac{*}{2}(x_i)]^2_i$$

$$= \min f - \frac{*}{2} . \quad (4)$$

选择模型 $y = pe^{qx} + g$, 则

$$y = 1.581e^{0.000123x} - 0.005 . \quad (5)$$

因此, RFPDA 探测器响应表示为目标温度 T_b 和环境温度 T_s 的函数,

$$V(T_b, T_s) = a + \frac{b}{1 + \exp(c - d \times T_b)} + pe^{qT_s} , \quad (6)$$

其中, a, b, c, d, p, q 为常系数, 且 $b > 0, d > 0, p > 0, q > 0$; 参数 (a, b, c, d, p, q) 表示各探测单元响应系数.

2 基于环境温度的非均匀性校正

2.1 环境温度 T_s 非均匀性的校正

设输入 $f(\phi)$, 校正输出 Y_s , 则

$$Y_s = p e^{qf(\phi)} + g . \quad (7)$$

(p, q, g) 是 T_s 校正系数. 第 $K(K \geq 3)$ 个均匀辐射, $\bar{f}_k = \frac{1}{(M \times N)} \sum_{(i,j)} f_{ij}(\phi_k)$ 表示像元 (i, j) 的理想输出, 对辐射 ϕ_1, ϕ_2 和 $\phi_3, f_{ij}(\phi_k)$ 与 \bar{f}_k 关系如下

$$\begin{cases} \bar{f}_1 = p_{ij} e^{q_{ij} f_{ij}(\phi_1)} + g_{ij} \\ \bar{f}_2 = p_{ij} e^{q_{ij} f_{ij}(\phi_2)} + g_{ij} \\ \bar{f}_3 = p_{ij} e^{q_{ij} f_{ij}(\phi_3)} + g_{ij} \end{cases} . \quad (8)$$

2.2 目标温度 T_b 非均匀性的校正

T_s 恒定, T_b 非均匀性的校正采用多点校正, 如图 4 将温度范围 $[\phi_0, \phi_{40}]$ 分为 $[\phi_0, \phi_{15}]$ 和 $[\phi_{15}, \phi_{40}]$.

3 实验结果及数据分析

利用 UL01011 型红外探测器, 改变 T_s , 测量探测器的信号输出. 图 5(a) 是 $T_s = 30$ 时, 单点校正

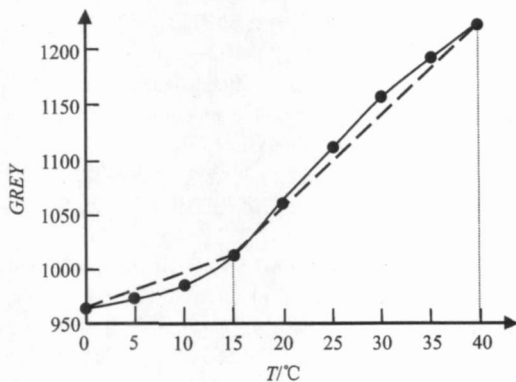


图 4 RFPDA 响应曲线及多点校正示意图
Fig 4 Response curve of RFPDA and piecewise linear correction scheme



图 5 人脸面部图像
Fig 5 The images of face

效果, 竖条噪声明显; 图 5(b) 保持目标不变, 改变 $T_s = 10$, (未重新校正), 竖条噪声严重, 出现波纹; 图 5(c) 是改变 $T_s = 10$ (重新校正), 与图 5(b) 相比, 固定模式噪声得到明显改善, 有少量竖条噪声; 图 5(d) 是本文算法处理效果, 改变 $T_s = 10$, (未重新校正), 利用第 2 节算法对 T_s 非均匀性进行校正, 对比图 5(b), 固定模式噪声得到抑制, 对比图 5(c), 竖条噪声减少, 有效避免了重复校正.

表 2 利用国标定义^[9]评估图像非均匀性,

$$U = \frac{1}{y(x)} \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [y_{ij}(x) - y(x)]^2} , \quad (9)$$

其中, $y_{ij}(x)$ 是像元 (i, j) 的输出, $y(x)$ 是所有像元均值, M 和 N 是阵列大小.

表 2 图像非均匀性评估

| Table 2 The nonuniformity evaluation of images | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|
| | 图 5(a) | 图 5(b) | 图 5(c) | 图 5(d) |
| U | 0.469 | 0.628 | 0.391 | 0.358 |

从表 2 可知, 非均匀性随 T_s 变化. T_s 改变大时, 重复校正可减弱非均匀性. 本文算法具有环境自适应性, T_s 改变时无需重新校正.

4 结论

分析了环境温度对 RFPDA 探测器信号输出的影响, 提出了一种基于环境温度和目标温度的非均匀性校正算法. 利用 UL01011 凝视型红外探测器, 对算法进行了数值仿真和验证. 实验表明, 该算法能较好适应环境温度变化, 有效提高了非均匀性校正的精度, 具有较强的实用价值.

REFERENCES

- [1] YN Shi-min, XIANG Li-bin, ZHOU Jin-song, *et al* Research on nonuniformity correction of RFPA based on radiation source scaling[J]. *Acta Photonica Sinica* (殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 辐射源标定红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究. *光子学报*), 2008, **37** (5): 992—995.
- [2] Wang Yue-ming, Chen Jian-xin, Liu Yin-nian, *et al* Study on two-point multi-section RFPA nonuniformity correction algorithm[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究. *红外与毫米波学报*), 2003, **22** (6): 415—418.
- [3] CHANG Ben-kang, CAI Yi *Infrared Imaging Arrays and System* [M]. Beijing: Science Press (常本康, 蔡毅, 编著. 红外成像阵列与系统. 北京: 科学出版社), 2006: 58—63.
- [4] SHI Yan, ZHANG Tian-Xu, LI Hui, *et al* New approach to nonuniformity correction of RFPA with nonlinear response[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (石岩, 张天序, 李辉, 等. 一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法. *红外与毫米波学报*), 2004, **23** (4): 251—256.
- [5] Wilhelm Isoz, Thomas Svensson, Ingnar Renhom Nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5783**: 949—960.
- [6] Yan Shi, Tian-xu Zhang, Zhi-guo Cao, *et al* A feasible approach for nonuniformity correction in RFPA with nonlinear response[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, **46** (4): 329—337.
- [7] QU Hui-ming, CHEN Qian A theoretical model on infrared focal panel arrays binary nonlinear nonuniformity[J]. *Acta Electronica Sinica* (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. *电子学报*), 2008, **36** (11): 2150—2153.
- [8] SUN Lian-jun, ZHANG Jun-ju, WANG Shi-yun, *et al* Research on operating temperature characteristic of uncooled microbolometer detector[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙恋君, 张俊举, 王世允, 等. 非制冷微测辐射热计探测器工作温度特性研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26** (3): 232—236.
- [9] 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).

(上接 26 页)

献 [8] 结合的方法可以良好地抑制目标退化, 但算法收敛所需时间较长, 边缘检测的运算量较大, 不易硬件实现. 文献 [8] 的方法的收敛速度较快, 但存在目标退化现象. 本文算法有效地补偿了坏元, 能抑制目标退化, 在算法收敛所需帧数和时间方面优于另外两种方法.

3 结论

分析了传统神经网络非均匀性校正算法时空域处理过程中产生目标退化的原因, 在总结比较已有校正算法的基础上, 提出了含有三个模块的组合校正算法. 运用含有弱小目标的实际红外图像对算法进行了验证, 结果表明, 其目标退化抑制能力、坏元处理能力、算法收敛速度都达到了较好的水平.

REFERENCES

- [1] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, *et al* Nonuniformity Correction for Staring IR Focal Plane Arrays Using Scene-Based Techniques[C]. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays*, SPIE, 1990, 1308: 224—233.
- [2] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, *et al* Adaptive Retina-like Preprocessing for Imaging Detector Arrays[C]. *Proc IEEE* 1993, 1955—1960.
- [3] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, *et al* Adaptive Nonuniformity Correction for IR Focal Plane Arrays Using Neural Networks[C]. *Infrared Sensors: Detectors, Electronics, and Signal Processing*, SPIE, 1991, **1541**: 100—109.
- [4] Harris J G Continuous-Time Calibration of VLSI Sensors for Gain and Offset Variations[C]. *Proc SPIE* 1995, **2474**: 23—32.
- [5] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity Correction Using the Constant-Statistics Constraint: Analog and Digital Implementations[C]. *Proc SPIE* 1997, **3061**: 895—905.
- [6] Harris J G, Chiang Y M. Minimizing the Ghosting Artifact in Scene-Based Nonuniformity Correction[C]. *Proc SPIE* 1998, **3377**: 106—113.
- [7] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan Eliminating the “ghosting” artifact and target fade-out in adaptive nonuniformity correction for RFPA[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序, 石岩. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法中目标退化与伪像的消除方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24** (5): 335—340.
- [8] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan, CAO Zhi-Guo Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in RFPA and the important of spatial adaptive nonuniformity correction technique[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进. *红外与毫米波学报*), 2005, **24** (4): 255—260.
- [9] Li Huaqiong, Chen Qian, Cao Wenkun Dynamic detection and compensation algorithm of defective pixels for RFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李怀琼, 陈钱, 高文昆. 红外焦平面阵列失效元动态检测与校正算法. *红外与激光工程*), 2006, **35** (2): 192—196.
- [10] Cao Zhiguo, Wei Luogang, Zhang Tianxu, *et al* Approach based on neural network for nonuniformity correction for RFPA[J]. *Infrared and Laser Engineering* (曹治国, 魏络刚, 张天序, 等. 基于神经网络法的焦平面器件非均匀性校正技术研究. *红外与激光工程*), 2000, **29** (1): 65—68.
- [11] Yang Shaolin, Yu Hui-min Scene-based nonuniformity correction algorithm in focal plane arrays[J]. *Journal of Zhejiang University* (Engineering Science) (杨少林, 于慧敏. 基于场景的焦平面阵列非均匀性校正算法研究. *浙江大学学报 (工学版)*), 2006, **40** (7): 1150—1153.
- [12] BG/T 17444 1998 The technical norms of measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays[S]. (国标 GB/T 17444 1998 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范).