

采用特征直方图的红外焦平面阵列盲元检测方法

张红辉^{1,2}, 罗海波^{1,3,4}, 余新荣⁵, 丁庆海⁶

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 4. 图像理解与视觉计算重点实验室,
辽宁 沈阳 110016; 5. 中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 江西 南昌 330024;
6. 空军装备研究院总体所, 北京 100076)

摘要: 红外探测器受材料和工艺等的限制, 普遍存在盲元问题, 降低了红外成像系统的图像质量, 影响了目标检测系统的检测概率和虚警率, 因此, 有效检测盲元是红外图像处理领域的一个重要研究方向。在分析了有效像元校正模型的基础上, 指出均匀辐照下红外焦平面阵列(IRFPA)有效像元非均匀校正后灰度图像的均值(MEAN)和标准差(STD)具有正态分布特征, 对特征直方图采用自适应正交投影分解法进行高斯分解, 得到有效像元校正后的 MEAN 和 STD 特征分布区间, 最终得到盲元的分类准则。对 IRFPA 进行的验证实验结果表明, 该方法获得了令人满意的结果, 证实了所提出检测方法的有效性和科学性。

关键词: 盲元检测; 响应特征; 直方图分解

中图分类号: TN215 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)06-1807-05

Blind-pixel detection algorithm for IRFPA by applying pixel's characteristics histogram analysis

Zhang Honghui^{1,2}, Luo Haibo^{1,3,4}, Yu Xinrong⁵, Ding Qinghai⁶

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
4. Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Shenyang 110016, China;
5. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Corporation LTD, Nanchang 330024, China;
6. Research Institute of General Development and Demonstration of Equipment, Equipment of Air Force, Beijing 100076, China)

Abstract: Due to the influence of material, fabrication technology and so on, blind-pixels exist on infrared focal plane array detectors. It reduces the infrared image quality and object detection capability, improves the object invarious rate. Effective blind-pixels detection for infrared image process is an important development issue. Based on the analysis of the model for the effective pixel corrected response, the approach was proposed that, when the corrected response was uniform, the means (MEAN) and the standard deviation (STD) were both normal distributed random variables for all effective pixels. Through adaptive projective decomposition of MEAN and STD histograms, the MEAN and STD

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(51005229)

作者简介: 张红辉(1978-), 男, 博士生, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: zhanghonghuizhh@163.com

导师简介: 罗海波(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: luohb@sia.cn

distribution range of effective pixel could be effectively estimated, and the detection rule for blind-pixel was got finally. The experimental result by applying real infrared image shows the proposed method for IRFPA blind-pixel detection is scientific and effective.

Key words: blind-pixel detection; response characteristic; histograms decomposition

0 引言

红外探测器受材料和工艺等因素的限制,不同程度地存在盲元问题。盲元的出现不仅大大降低了红外成像系统的图像质量^[1-2],而且对应用于目标探测领域的系统来说,盲元的存在将严重影响系统的检测概率和虚警率^[3]。盲元检测是一项非常关键的技术,是影响红外成像系统图像质量的主要因素之一;盲元的过判别会损失图像信息;而欠判别则严重影响系统对点/斑状目标的检测/跟踪性能。因此,有效检测盲元是一项十分必要的工作。

目前,国内外已经提出的盲元检测方法有定义法^[4]、双阈值迭代法^[5]、 3σ 法^[6]、直方图法^[7]等,定义法由于采用固定阈值进行分类,容易出现漏判;双阈值迭代法、 3σ 法均涉及阈值的选取,不恰当的阈值容易造成盲元的漏判或过判。文中对参考文献[7]中的有效像元响应模型进行了分析,找到了其响应分布不符合高斯分布的原因,并对其选取的特征进行优化,得到有效像元校正后的分布区间,从而得到检测盲元的分类准则。

1 有效像元的响应模型及分析

参考文献[7]定义 IRFPA 光敏面的响应模型为:在 IRFPA 的正常工作范围内,即输入辐照度 $\Phi \in [\Phi_{\min}, \Phi_{\max}]$,其有效像元 (i,j) 在第 k 帧的输出信号 Y_{ij}^k 与输入辐照度 Φ_{ij}^k 之间的关系为:

$$Y_{ij}^k = f_{ij} \Phi_{ij}^k + V_{ij}^k \quad (1)$$

式中的 $f_{ij} : \Phi \rightarrow Y_{ij}^k$ ($\Phi \in [\Phi_{\min}, \Phi_{\max}]$) 为有效像元 (i,j) 的响应函数; V_{ij}^k 为像元 (i,j) 在第 k 帧的时域噪声。对 f_{ij} 用 Φ 的 n 次多项式近似,则公式(1)近似为:

$$Y_{ij}^k \approx \sum_{r=1}^n a_{ij}^r (\Phi_{ij}^k)^r + a_{ij}^0 + V_{ij}^k \quad (2)$$

对于有效像元 (i,j) 的响应特征参数 a_{ij}^r , $r=0,1,2,$

\dots, n 和时域噪声 V_{ij}^k , 根据中心极限定理,应具有如下分布性质:根据特征 STD_{ij} (STD_{ij} 为有效像元 (i,j) 时域噪声 V_{ij}^k 的标准差) 及校正特征参数 a^r ($r=0,1,2,\dots, n$), 焦平面阵列中有效像元可以分为若干组, 每组中有效像元的 STD 和 a^r 服从正态分布。

理论上在给定的均匀辐照输入下, 焦平面阵列红外探测器输出应该是相同的, 所有像元响应输出的统计结果应满足中心极限定理, 即符合高斯分布。但由于制造工艺、光学系统等原因, 输出的红外图像存在明显的非均匀性, 特别是光学系统引入的辐射能量随半径和曲率的变化而变化导致的非均匀性。理论和实践表明, 由红外光学系统引入的非均匀性可用下式表示:

$$E = E_0 \times \cos^4 \theta \quad (3)$$

式中: E_0 为光子能量, 取值为 1800cm^{-1} (中波) 或 590cm^{-1} (长波); θ 为像元相对于光学系统中心轴的偏移角。

图 1 所示为一个实际的红外成像系统在均匀辐照输入下获取的图像及其灰度直方图, 可以看出, 其灰度统计直方图分布不符合高斯分布特征。

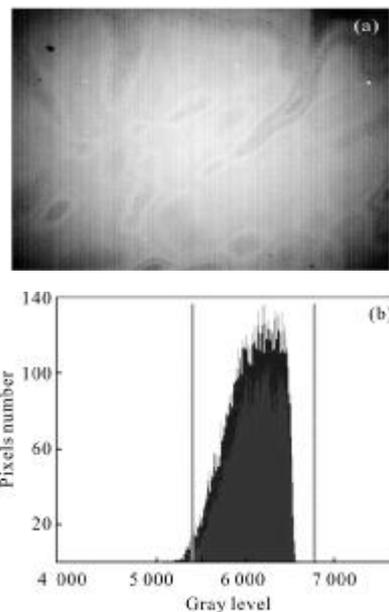


图 1 红外原始输出图像及其直方图统计结果
Fig.1 Image and histogram of original IRFPA pixel

在红外图像处理中,非均匀校正是关键的图像预处理工作,其目的是使热像仪在相同辐照下输出的整幅图像具有相同的灰度值。非均匀性校正后的图像及其直方图分布如图 2 所示。

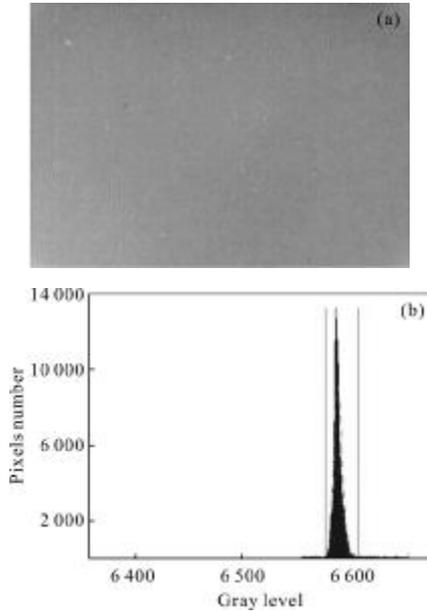


图 2 非均匀校正后红外图像及其直方图统计分布
Fig.2 Image and histogram of corrected IRFPA pixel

可以看出,经过非均匀性校正的图像统计结果符合高斯分布。因此修订有效像元的响应模型,将红外图像非均匀性校正的输出作为上述有效像元响应模型的输出,使其输出图像的统计直方图符合高斯分布特征。

2 基于特征直方图的盲元检测算法

2.1 有效像元特征的选择及其分布特点

直方图^[8]分布形状采用中心矩(也称为均值的矩)的方法描述,其一阶矩为均值,二阶矩为方差。

均值是图像平均灰度的度量,方差是图像对比度的度量,因此结合直方图分布特征的描述方法,选择 MEAN 和 STD 两个特征,并根据其直方图分布特点确定盲元分布特征。

根据前述性质,可以通过如下方法得到两个特征参数来确定有效像元,在给定两个不同的均匀辐照输入(低辐照度 Φ_L 和高辐照度 Φ_H 两个定标点)条件下,分别得到两组 N 帧定标图像数据;其中 $MEAN_{ij}^L$ 和 $MEAN_{ij}^H$ 分别为有效像元 (i,j) 在 Φ_L 和 Φ_H 输入时 Y_{ij}^k 的样本均值, STD_{ij}^L 和 STD_{ij}^H 分别为有效像元 (i,j) 在

Φ_L 和 Φ_H 输入时 Y_{ij}^k 的样本标准差。得到所有 IRFPA 像元的 MEAN(或者是 STD)所构成的直方图,这些直方图由两种分布叠加而成:一种为高斯分布,在直方图中占较大比重,是由有效像元构成的分布;另一种为比重较小的密度函数未知的分布,是由无效像元构成的。

2.2 有效像元特征的分布范围及分类准则

基于高斯信号集的自适应正交投影分解法(AOPD)利用最大投影的原理来循环搜索与原信号最匹配的基函数集,从而能以最简洁的方式重构信号。结合此分解法对直方图进行分解,得到信号中各个高斯分量的均值、标准差和权值,从而得到有效像元的分布特征并作为分类的标准,就可以检测出盲元。

设图像的灰度直方图为 $p(z)$,其中 $0 \leq z \leq L-1$, L 为图像灰度等级,可以将 $p(z)$ 看作是 N 个高斯函数的叠加,即:

$$p(z) = \sum_{i=1}^N A_i g_i(z) + r(z) \quad (4)$$

式中: $g_i(z) = (\pi\sigma_i^2)^{-0.25} \exp\left(-\frac{(z-u_i)^2}{2\sigma_i^2}\right)$ 是均值为 u_i 、方差为 σ_i^2 的高斯信号, A_i 为其权值; $r(z)$ 为分解后的信号残差, N 为分解个数。

针对校正后图像 MEAN 特征直方图,由 AOPD 方法得到 $N+1$ 个高斯分量,对高斯函数 $f(u_n^{MEAN}, (\sigma_n^{MEAN})^2)$ 应用 3σ 原则,则校正后图像有效像元的 MEAN 特征值应属于区间:

$$\Omega^{MEAN} = \bigcup_{n=1}^N \left[u_n^{MEAN} - 3\sigma_n^{MEAN}, u_n^{MEAN} + 3\sigma_n^{MEAN} \right] \quad (5)$$

针对校正后图像 STD 特征直方图,用同样的方法可以得到校正后图像有效像元的 STD 特征值应属于的区间集合 Ω^{STD} 。

根据上面得到的有效像元两个特征分布的区间集合可以得到最终的有效像元所构成的集合:

$$\Theta_{ab} = \{ \text{pixel}(i,j) / MEAN_{ij} \in \Omega^{MEAN} \} \cap \{ \text{pixel}(i,j) / STD_{ij} \in \Omega^{STD} \} \quad (6)$$

因此,盲元所构成的集合为:

$$\Theta_{ab} = \{ \text{pixel}(i,j) / MEAN_{ij} \notin \Omega^{MEAN} \} \cup \{ \text{pixel}(i,j) / STD_{ij} \notin \Omega^{STD} \} \quad (7)$$

3 仿真及结果分析

采用像元阵列为 320×256 的中波凝视红外热像仪, 焦平面像元输出的电压信号经过放大, A/D 变换后得到 14 bit 输出。根据前述测试方法, 给定两个定标均匀辐照度输入 Φ_L 和 Φ_H , 各自得到 80 帧非均匀校正后的图像, 计算校正后图像的 MEAN、STD 特征形成相应的直方图。图 3 和图 4 为校正后图像 MEAN 和 STD 特征的原始直方图及利用 AOPD 分解法估计出的高斯分量重构出来的直方图。

可以看出, 利用 AOPD 法估计出来的高斯函数参数重构后得到的曲线比较理想地反映了原直方图的基本轮廓, 验证了有效像元校正后灰度图像分布特征符合正态分布假设的合理性。

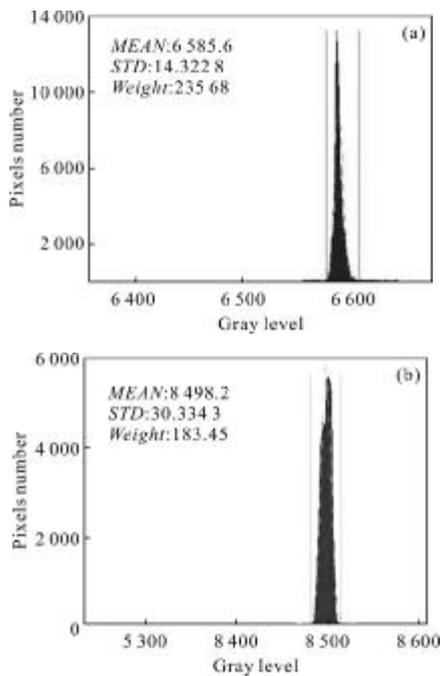


图 3 像元 MEAN_L、MEAN_H 特征直方图及重构后直方图

Fig.3 Original and reconstructed MEAN histogram

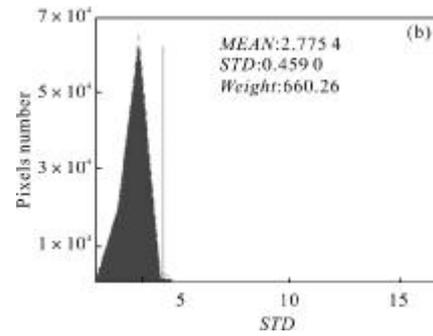
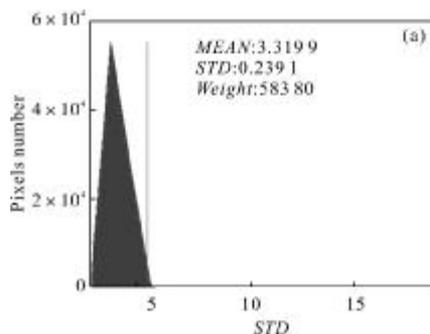


图 4 像元 STD_L、STD_H 特征直方图及重构后直方图

Fig.4 Original and the reconstructed STD histogram

图 5 为 IRFPA 输出的经过非均匀校正后未进行盲元补偿的黑体图像, 根据参考文献[4]得到的盲元分类准则及检测结果如表 1 所示, 并对其进行剔除, 以图像方式表达如图 6 所示。根据文中方法得到的盲元分类准则及检测结果如表 2 所示, 并对其进行剔除, 以图像方式表达如图 7 所示。

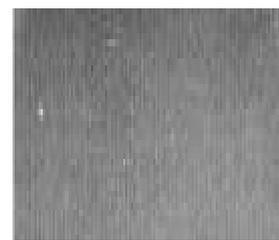


图 5 未进行盲元补偿的黑体图像

Fig.5 Real infrared black body image without removing blind-pixels

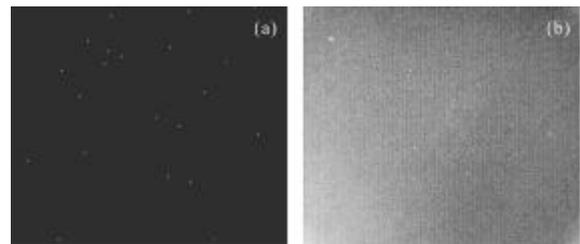


图 6 由参考文献[4]得到的盲元集合及剔除后的图像

Fig.6 Blind-pixels and removed image according to reference [4]

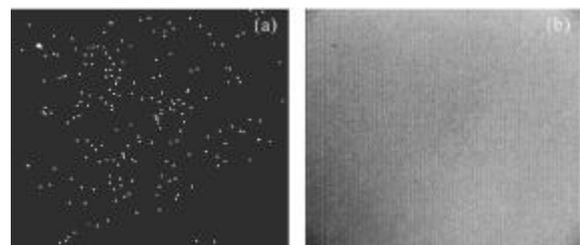


图 7 由文中方法得到的盲元集合及剔除后的图像

Fig.7 Blind-pixels and removed image according to proposed algorithm

表 1 根据参考文献[4]得到的盲元检测结果

Tab.1 Result for blind-pixels according to reference[4]

	Discrimination rule	Number
U	$U < 6574.2$	24
STD	$STD > 27.7538$	0
Total		24

表 2 文中方法的检测结果

Tab.2 Result for blind-pixels according to proposed algorithm

	μ_i	σ_i	A_i	Discrimination rule	Number
U_L	658 5.6	3.784 5	23 568	$U < 6 574.246 5$ or $U > 6 596.953 5$	68
U_H	849 8.2	5.507 7	18 345	$U < 8 481.676 9$ or $U > 8 514.723 1$	150
STD	2.775 4	0.459 0	66 026	$STD > 4.152 4$	63
Total					212

由表 1 和图 5(b)可以看出,由参考文献[4]得到的判别盲元的标准显然过低。而采用文中方法可以实现盲元有效检测。

4 结束语

针对 IRFPA 盲元检测问题,文中在分析有效像元在经过非均匀校正后灰度分布特征的基础上,提出了一种对 IRFPA 校正后特征直方图进行高斯分解,从而实现盲元检测的方法。实验结果表明,该方法合理、有效,有利于红外系统在目标检测等方面的应用。

参考文献:

- [1] Wang Wei, Fan Yangyu. Determination of IRFPA bad pixels with offset criterion [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3172-3175. (in Chinese)
王巍, 樊养余. 红外焦平面阵列盲元的电平判别法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3172-3175.
- [2] Wang Wei, Fan Yangyu, Si Junjie, et al. Analysis on formation of bad pixel cluster in IRFPA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2857-2860. (in Chinese)
王巍, 樊养余, 司俊杰, 等. 红外焦平面阵列盲元簇成因分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2857-2860.
- [3] Wen Peizhi, Shi Zelin. A method for detecting IR target in natural background based on wavelet transform and morphology[J]. Information and Control, 2004, 33(1): 107-111. (in Chinese)
温佩芝, 史泽林. 基于小波和形态学的自然地面背景红外目标检测方法[J]. 信息与控制, 2004, 33(1): 107-111.
- [4] GB/T17444-1998. The technical norms for measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays [S]. Beijing: China Standards Press, 1998. (in Chinese)
GB/T17444-1998. 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [5] Zhou Huixin, Wei Yajiao. Blind-pixel iterative detection algorithm based on double threshold for uncooled IRFPA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 796-798. (in Chinese)
周慧鑫, 魏亚皎. 采用双阈值的非制冷 IRFPA 盲元迭代检测算法 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 796-798.
- [6] Zhang Ke, Zhao Guifang, Cui Ruiqing, et al. Method of improving bad pixel detection precision of IRFPA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(4): 453-456. (in Chinese)
张科, 赵桂芳, 崔瑞青, 等. 一种提高红外焦平面阵列盲元检测精度的方法 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 453-456.
- [7] Shi Yan, Mao Haicen, Zhang Tianxu, et al. New approach of IRFPA non-effective pixel discrimination based on pix's characteristics histogram analysis [J]. Infrared Millim Waves, 2005, 24(2): 119-124. (in Chinese)
石岩, 毛海岑, 张天序, 等. 一种新的基于特征直方图分解的红外焦平面阵列无效像元判别方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 119-124.
- [8] Liu Shirong, Zhu Weitao. Multi-feature fusion based particle filter algorithm for object tracking [J]. Information and Control, 2012, 41(6): 752-759. (in Chinese)
刘士荣, 朱伟涛. 基于多特征融合的粒子滤波目标跟踪算法[J]. 信息与控制, 2012, 41(6): 752-759.