基于模糊中值的 IRFPA 自适应盲元检测与补偿

冷寒冰,宫振东,谢庆胜,范哲源,武登山

(中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

摘 要:红外焦平面阵列(IRFPA)的盲元既包括因材料与制造工艺的缺陷而导致的固定盲元,也包括因环境温度的漂移而出现的随机盲元。基于场景的盲元检测与补偿算法是去除这两种盲元,提高 IRFPA 成像质量的有效手段。针对目前滤波类场景检测算法无法有效区分弱小点目标和随机盲元的缺陷,重点研究了随机盲元的响应特性和噪声特性,并提出了一种基于模糊中值与时域累积的盲元自适应检测与补偿算法。首先利用模糊中值滤波器从场景中提取出潜在的盲元,并通过多帧累积确定固定盲元和随机盲元的正确分布,最后对盲元进行实时补偿。实验结果证明:该算法可以有效地实现对盲元的校正,同时避免对弱小点目标的误判别。

关键词:红外焦平面阵列; 随机盲元; 盲元检测与补偿; 模糊中值

中图分类号:TN21 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2015)03-0821-06

Adaptive blind pixel detection and compensation for IRFPA based on fuzzy median filter

Leng Hanbing, Gong Zhendong, Xie Qingsheng, Fan Zheyuan, Wu Dengshan

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Blind pixels of IRFPA consist of fixed bad pixel and random bad pixel, the former is caused by material and manufacture defect, while the latter is mainly caused by temperature drift. Scene-based blind pixel detection and compensation algorithm is the effective method to eliminate these bad pixels and increase image quality. Aiming at the defect that the current filter-based detection methods can't distinguish random blind pixels and weak point targets, the response and noise feature of random blind pixels were first analyzed, and a new adaptive blind pixel detection and compensation algorithm based on fuzzy median and temporal accumulation was proposed. Fuzzy median filter was used to extract the potential blind pixels from scenes, then the exact distribution of fixed and random blind pixels were determined by temporal accumulation, and blind pixel compensation was performed finally. The experiments show that the proposed algorithm can effectively correct bad pixels while avoid misjudging weak point targets.

Key words: IRFPA; random bad pixel; blind pixel detection and compensation; fuzzy median

收稿日期:2014-07-10; **修订日期**:2014-08-12

基金项目:国家自然科学基金(61201376);中国科学院西部之光项目(Y229E21213)

作者简介:冷寒冰(1978-),男,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事红外图像信号处理方面的研究。Email:lenghanbing@opt.ac.cn

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0 引 言

红外焦平面阵列(IRFPA)是红外成像系统的核心。在 IRFPA 的应用过程中，响应非均匀性与盲元是影响系统温度分辨率的首要障碍。IRFPA 的盲元包括固定盲元与随机盲元，固定盲元主要来源于材料特性的影响和制造工艺的限制，其响应特性为始终具有过高或过低的响应；随机盲元主要来自于环境温度的漂移和工作状态的改变，其响应特性在某段时间内与正常像元类似，在另外的时间段内与固定盲元类似。固定盲元和随机盲元的存在既降低了图像的质量,也影响了后续的目标探测和识别。盲元检测与补偿技术是消除盲元影响，提高成像质量的有效措施。

目前常用的盲元检测方法分为两类:一类为辐射定标法,另一类为场景检测法。辐射定标法通常利用不同温度下的黑体获取均匀辐射图像,并在此基础上根据盲元和正常探测元在响应特性、噪声特性等方面的差异将二者进行区分。参考文献[1]提出了基于双参考辐射源的检测方法，利用双阈值确定盲元的分布。参考文献[2]对定标数据进行特征直方图分解,估算出有效像元的均值差和标准差的分布区间,进而实现对盲元的检测。参考文献[3]采用滑动窗口,统计定标数据局部窗口内的均值和标准差,通过经验性的阈值将盲元与非盲元进行区分。参考文献[4-5]利用三维噪声模型对定标数据进行分析,分别通过 NETD 的值和各噪声分量将盲元和非盲元进行区分。

基于场景的盲元检测方法使用实时采集的图像数据，通过分析场景图像中正常探测元和盲元的不同成像特性,将两者进行区分。场景检测法不依赖额外的设备，能够有效地校正 IRFPA 本身所固有的盲元和因环境温度变化而产生的随机盲元，具有更高的检测效率和更好的环境适应性。常用的场景类检测算法目前主要有双线性外推法与非线性滤波法。参考文献[6-7] 提出基于双线性外推的方法实现了对盲元的检测与补偿。参考文献[8]提出了基于中值滤波的统计方法，将原始图像与其中值滤波的结果相减,通过合适的阈值判定盲元。参考文献[9]提出将红外场景图像分解为盲元和背景，通过背景预测模型提取出背景后，利用盲元与正常像元的差异实现图像盲元检测，由于该方法的背景预测模型是建立在中值滤波的基础之上的，所以该方法也可以归结为中值滤波类算法。

对盲元的补偿目前主要有两类方法，一类是基于单帧处理的补偿方法，另一类是基于图像序列的补偿方法。参考文献[1-5]中采用了基于单帧的邻域非盲元均值替换法,参考文献[8-9]采用基于单帧的邻域非线性滤波输出对盲元进行补偿。参考文献[10]提出了基于图像序列的非线性插值补偿方法，通过对图像序列进行运动分析,利用相邻帧和当前帧的正常像元非线性插值数据对当前帧的盲元进行补偿。

基于场景的盲元检测方法能够将固定盲元和因温度漂移而导致的随机盲元检测出来。但由于红外场景的复杂性，以上算法对于复杂场景的适应性有待于深入进行研究。尤其是当对弱小点目标进行检测与跟踪时，目前的场景类盲元检测算法容易将点目标误判为盲元,并进行补偿,从而对点目标的检测和识别造成障碍。文中在分析了各种盲元响应特性的基础上，提出了基于模糊中值与时域累积的盲元检测与补偿算法，在实现盲元有效检测与补偿的同时避免了对弱小点目标的误判别，并利用实际的红外场景数据验证了该算法的有效性。

1 盲元的响应特性与视觉表现

1.1 盲元的定义与视觉表现

对 IRFPA 盲元的定义目前并没有一个绝对正确的标准。国标[11]从像元响应率和噪声电压出发,将盲元分为过热像元和死像元，并给出了相应的测试方法。过热像元指像元噪声电压大于 10 倍平均噪声电压的像元,死像元指像元响应率小于 1/10 平均响应率的像元。该标准的测试方法是建立在黑体辐射定标的基础之上的，并且忽略了探测元响应特性的漂移,因此只适合于固定盲元的检测与校正。对于随机盲元的响应特性与检测方法,该标准并未有论述。

图 1 为使用某 320×256 非制冷长波 IRFPA 采集得到的两帧红外图像序列，该图像经过了两点非均匀性校正处理,未经过盲元补偿处理,两点校正系数通过室温环境下的黑体辐射定标获得。从图中可以看出,死像元通常表现为灰点或暗点,而过热像元通常表现为白点或亮点,与点目标(方框中)具有极大的相似性。

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

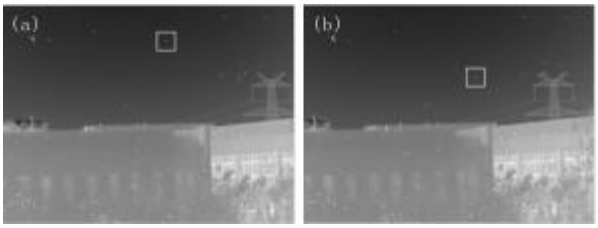


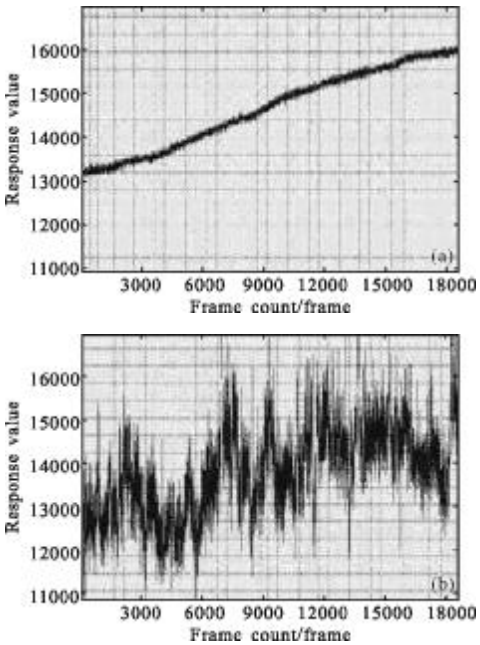
图 1 含有盲元和点目标的红外图像

Fig.1 IR image with blind pixel and target

1.2 随机盲元的响应特性

在 IRFPA 的实际应用中，探测元响应特性的漂移是不可忽视的重要因素，它对图像的质量和系统的温度分辨率有着重要的影响。由于环境温度的漂移以及内部工作状态的改变,IRFPA 的探测元中还经常存在一类“闪变像元”(Flickering pixel),其响应在某个时间段内类似于正常像元，在另一个时间段内类似于盲元。

使用上述 320×256 非制冷长波 IRFPA，在保持室内环境温度不变的情况下,在探测器开机 2 h 进入热平衡之后,连续采集 4 h 的黑体定标数据。通过对各探测元响应值的分析，发现随机盲元具有如下几种响应特性:(1) 相邻帧间的响应值波动范围较小,随着时间的漂移,响应值逐渐升高,最终趋于稳定,如图 2(a)所示;(2) 相邻帧间的响应值始终具有较大范围的波动,如图 2(b)所示;(3) 在某段时间内具有较高的响应,某段时间内具有较低的响应,段内响应值的波动范围不大,总体响应趋势逐渐升高,如



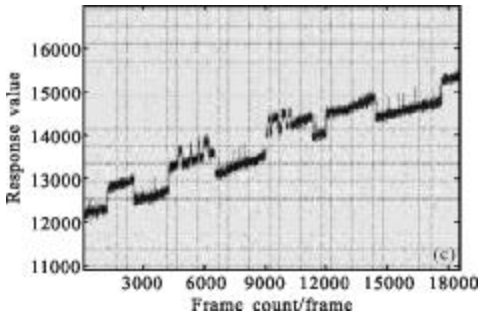


图 2 随机盲元响应特性

Fig.2 Response character of random blind pixels

图 2(c)所示。图 2 中横坐标为帧数,纵坐标为 A/D 变换后的原始响应值。固定盲元的响应特性曲线如参考文献[1]中所示。

通过对采集的多个数据源进行分析后发现,随机盲元的位置是不固定的，当积分时间等工作参数发生改变时,随机盲元的分布也会发生改变,位置的不确定性为其检测增加了难度。

1.3 随机盲元的时间噪声特性

在均匀入射辐射条件下,设 $\mathbf{M}\times\mathbf{N}$ 大小的焦平面阵列第 f 帧第 i 行第 j 列的输出信号为 $\mathbf{X}(f,i,j)$,采集 $\mathbf{F}$ 帧图像,则第 i 行第 j 列像元输出的平均值为:

$$\bar{\mathbf{X}}(i,j)=\sum_{f=1}^{\mathbf{F}}\mathbf{X}(f,i,j)/\mathbf{F} \tag{1}$$

像元(i,j)的时间噪声定义为:

$$\sigma(i,j)=\left[\sum_{f=1}^{\mathbf{F}}(\mathbf{X}(f,i,j)-\bar{\mathbf{X}}(i,j))^2/(\mathbf{F}-1)\right]^{1/2} \tag{2}$$

设 $\sigma(i,j)$的最大值、最小值与平均值分别为 $\sigma\max$、$\sigma\min$ 和 $\bar{\sigma}$，设有三个集合分别为 $\mathbf{L}$、$\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{H}$:$\mathbf{L}=[\sigma\min,0.5\bar{\sigma}]$,$\mathbf{M}=[0.5\bar{\sigma},1.5\bar{\sigma}]$,$\mathbf{H}=[1.5\bar{\sigma},\sigma\max]$。以黑体入射辐射为 290 K×310 K，积分时间为 35 μs时采集的 10 000 帧数据为例,分析 IRFPA 各探测元的时间噪声状况,图 3 为 IRFPA 各探测元时间噪声三维

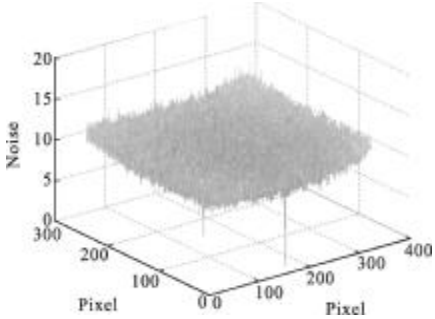


图 3 时间噪声三维分布图

Fig.3 3D distribution of temporal noise

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

分布图，表 1 为探测元在不同时间噪声区间内的分布百分比。

表 1 不同时间噪声区间的探测元分布

Tab.1 Detector distribution of different noise regions

Temporal noise	L	M	H
290 K	0.01%	99.67%	0.32%
300 K	0.01%	99.75%	0.24%
310 K	0.01%	99.84%	0.15%

如表 1 所示，绝大多数 IRFPA 探测元的时间噪声均位于中间区间 **M** 之内，只有极少部分探测元的时间噪声过大或过小，分布在 **L** 和 **H** 区间之内。结合上文中对盲元响应特性的分析可知，固定盲元的时间噪声通常较小，常分布于区间 **L** 中，而随机盲元的时间噪声通常较大，常分布于区间 **H** 中。

2 自适应盲元检测与补偿算法

由于随机盲元的位置具有不确定性，对其检测必须依赖于场景进行自适应处理。考虑到红外图像的某些细节信息例如边缘以及点目标与盲元的视觉特征类似，提出了一种基于模糊中值滤波与时域累积的盲元检测算法，并使用模糊中值滤波后的值对盲元进行补偿，具体流程如图 4 所示。

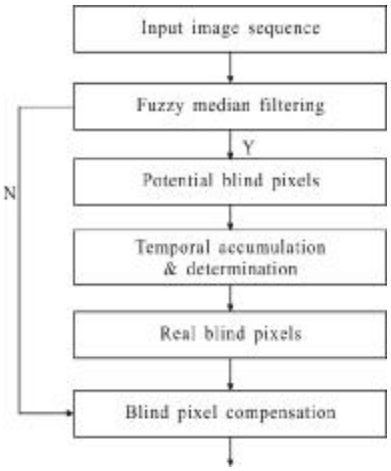


图 4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of proposed algorithm

2.1 模糊中值滤波

设输入的单帧红外场景图像为 $\mathbf{X}(i,j)$，定义滤波窗口为 $\mathbf{W}$，它以 $\mathbf{X}(i,j)$ 为中心，包含 $(2n+1)\times(2n+1)$ 个像元，考虑到 IRFPA 可能存在块状的固定盲元，$\mathbf{W}$ 通常可以取 5×5 或 7×7。对于滤波窗口 $\mathbf{W}$，引入新的变量 $\mathbf{Y}$，如公式(3)所示，其中 m 和 n 不同时为 0。因此，$\mathbf{Y}(i+m,j+n)$ 实际上表征了窗口 $\mathbf{W}$ 中其余像元与中心像元的差值。

$$\mathbf{Y}(i+m,j+n)=\mathbf{X}(i+m,j+n)-\mathbf{X}(i,j) \tag{3}$$

定义 $\mathbf{Z}(i,j)=\max\{\mathbf{Y}(i+m,j+n)\}$，通过分析可知：当 $\mathbf{X}(i,j)$ 为盲元、点目标或边缘细节时，它与周围像素点的差别较大，从而 $\mathbf{Z}(i,j)$ 将会很大；当 $\mathbf{Z}(i,j)$ 较小时，说明 $\mathbf{X}(i,j)$ 与其邻近像素点灰度类似，极有可能为正常像元；当 $\mathbf{Z}(i,j)$ 较大时，$\mathbf{X}(i,j)$ 可能为盲元，也可能为某些细节信息。考虑到单纯的通过灰度阈值对盲元进行判断通常会造成较大的误差，文中提出采用模糊加权的方法来获得原始图像的估计，如公式(4)所示。

$$\mathbf{F}(i,j)=(1-\mu(i,j))\hat{\mathbf{X}}(i,j)+\mu(i,j)\times\mathrm{median}(\mathbf{W}(i,j)) \tag{4}$$

式中：$\hat{\mathbf{X}}(i,j)$ 为 $\mathbf{X}(i,j)$ 模糊中值滤波后的灰度值；$\mu(i,j)$ 为模糊隶属度函数，$\mu(i,j)$ 越大，则 $\mathbf{X}(i,j)$ 为盲元的可能性越大，$\mathrm{median}(\mathbf{W}(i,j))$ 为滤波窗口 $\mathbf{W}$ 中像元的中值。$\mu(i,j)$ 的取值由公式(5)决定，其中 a 和 b 的取值与红外图像 $\mathbf{X}(i,j)$ 的灰度级 L 相关($\mathbf{X}(i,j)$ 为 8 位图像时 $L=256$)，通常 $a=0.1\times L$，$b=0.3\times L$。

$$\mu(i,j)=\begin{cases}0 & \mathbf{Z}(i,j)<a\\ \dfrac{\mathbf{Z}(i,j)-a}{b-a} & a\leqslant\mathbf{Z}(i,j)<b\\ 1 & \mathbf{Z}(i,j)\geqslant b\end{cases} \tag{5}$$

设 $\mu 0=(\mathbf{Z}(i,j)-a)/(b-a)$，当 $\mu(i,j)\in[0,\mu 0)$ 时，$\mathbf{X}(i,j)$ 为正常像元；当 $\mu(i,j)\in[\mu 0,1)$ 时，$\mathbf{X}(i,j)$ 可能为盲元也可能为正常像元；当 $\mu(i,j)=1$ 时，$\mathbf{X}(i,j)$ 为盲元。

2.2 时域累积判断

对于单帧红外场景图像，假设利用模糊中值滤波检测出的潜在盲元位置分布矩阵为 $\mathbf{B}(i,j)$，$\mathbf{B}(i,j)$ 为 0 时对应的像元 (i,j) 为正常像元，$\mathbf{B}(i,j)$ 为 1 时对应的像元 (i,j) 为潜在盲元，$\mathbf{B}(i,j)$ 由公式(6)确定。

$$\mathbf{B}(i,j)=\begin{cases}0 & \mathbf{Z}(i,j)<a\\ 1 & \mathbf{Z}(i,j)\geqslant a\end{cases} \tag{6}$$

由于区间 (a,b) 内检测出来的盲元可能为盲元，也可能为有用的细节信息，具有一定的不确定性，因此文中采用时域累积的方法，对由红外序列图像得到的盲元分布序列进行累加。假设在某个时间段内共采集了 F 帧图像，由模糊中值滤波得到的单帧图像对应的盲元分布为 $\mathbf{B}(f,i,j)$，$f=1,2,\cdots$，

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

F。计算盲元分布矩阵的累加值 Bsum(i,j),假设 Bmax= max{Bsum(i,j)},则最终的盲元分布 BF(i,j)由公式(8)决定,其中,ρ 为置信度,表征 IRFPA 探测元为盲元的可能性,其值越接近 1,表明为盲元的可能性越高,通常可取值为 0.99。

$$\mathbf{B}\mathrm{sum}(i,j)=\sum_{f=1}^{F}\mathbf{B}(f,i,j) \tag{7}$$

$$\mathbf{BF}(i,j)=\begin{cases}0 & \mathbf{B}\mathrm{sum}(i,j)<\rho\mathbf{B}\mathrm{max}\\ 1 & \mathbf{B}\mathrm{sum}(i,j)\geqslant\rho\mathbf{B}\mathrm{max}\end{cases} \tag{8}$$

3 实验及分析

为验证文中提出算法的性能，在 320×256 非制冷长波红外相机中集成了文中提出的算法。盲元补偿前的图像为 8 位,如图 1(b)所示,模糊中值滤波的窗口为 5×5。图 5 为文中算法提取出的包含固定盲元和随机盲元在内的盲元分布图，图 6 为经过文中算法处理后的图像，从图中可以看出盲元已经得到了有效去除,而点目标(方框中)仍然保留了下来。该相机的输出帧频为 50 帧/s，算法中用于进行时域累积判断的帧数为 3000，即每隔 1 min 更新一次盲元分布。由于随机盲元的位置是缓变的,因此采用合适的时域累积帧数可以将随机盲元和固定盲元一起检测出来。

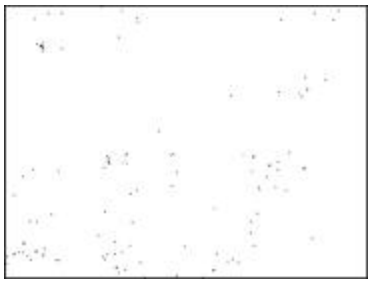


图 5 所有盲元的分布图

Fig.5 Distribution of all bad pixels

图 6 盲元补偿后的图

Fig.6 Image after bad pixel compensation

4 结 论

IRFPA 长时间地处于工作状态时，因温漂而导致的随机盲元会导致图像质量的降低和温度分辨率的下降，基于场景的盲元检测算法为该问题的解决指明了可能的途径。文中利用实际的红外图像序列，分析了长时间工作后随机盲元的响应特性和时间噪声特性，提出了基于模糊中值滤波和时域累积的自适应盲元检测与补偿算法，实验结果验证了该算法的有效性。

参考文献:

[1] Zhou Huixin, Wei Yajiao, Qin Hanlin, et al. Blind-pixel iterative detection algorithm based on double threshold for uncooled IRFPA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 795-799. (in Chinese)
周慧鑫, 魏亚娇, 秦翰林, 等. 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): 795-799.

[2] Shi Yan, Mao Haicen, Zhang Tianxu, et al. New approach of IRFPA noneffective pixel discrimination based on pixel's characteristics histogram analysis[J]. Jounal of Infrared and Millimeter 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.

[3] Li Yanjun, Cui Ruiqing, Zhao Guifang, et al. A new method of bad pixel detectin and compensation of IRFPA [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(1): 51-52. (in Chinese)
李言俊, 崔瑞青, 赵桂芳, 等. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测方法[J]. 激光与红外, 2007, 37(1): 51-52.

[4] Li Qiuming, Hou Qingyu, Wu Chunfeng, et al. Detection and classification of blind pixels based on statistical characteristic abnormity of 3D noise [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(1): 37-40. (in Chinese)
李秋明, 候晴宇, 武春风, 等. 基于三维噪声统计特性异常的盲元检测与分类[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1): 37-40.

[5] Sun Hui, Sun Kai, Hou Qingyu. Blind-pixel detection based on the abnormality of statistic characteristic of fixed pattern noise [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(2): 16-19. (in Chinese)
孙慧, 孙凯, 候晴宇. 基于固定图形噪声统计特性异常的盲元检测方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(2): 16-19.

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

[6] Li Huaiqiong, Chen Qian, Gao Wenkun. Dynamic detection and compensation algorithm of defective pixels for IRFPA[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35 (2): 192-196. (in Chinese)
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[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 192-196.

[7] Zhang Xining, Improved blind element inspection algorithm of infrared FPA array [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(10): 1149-1153. (in Chinese)
张熙宁. 一种改进的红外焦平面阵列盲元检测算法[J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1149-1153.

[8] Liu Chongliang, Jin Weiqi, Cao Yang, et al. New dynamic algorithm for IRFPA bad pixel detection and compensation based on statistics [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 18 (4): 463-467.

[9] Huang Xi, Zhang Jianqi, Liu Delian. Algorithm of blind pixels adaptive detection and compensation for infrared image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 370-375. (in Chinese)
黄曦, 张建奇, 刘德连. 红外图像盲元自适应检测及补偿算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 370-375.

[10] Wang Bingjian, Liu Shangqian, Li Qing, et al. Blind-pixel correction algorithm for an infrared focal plane array based on moving scene analysis [J]. Optical Engineering, 2006, 45(3): 036401: 1-4.

[11] 国家技术监督局. 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. (in Chinese)

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com