

# 基于贝叶斯估计的 IRFPA 自适应非均匀性校正

冷寒冰 谢庆胜 刘伟 易波 唐利霖 张建

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘要** 针对长时间工作后红外焦平面阵列(IRFPA)响应特性发生漂移, 图像质量下降的问题, 分析了两点校正(TPC)后残留非均匀噪声的特性, 在 TPC 的基础上提出了一种自适应非均匀性校正方法。将两点校正后的图像进行小波分解, 利用贝叶斯阈值逐点进行信号方差和噪声方差的估计, 计算出残留非均匀噪声并加以去除。实验结果表明, 该算法可以有效去除残留非均匀噪声, 避免因红外焦平面阵列响应特性漂移而导致的图像降质。

**关键词** 成像系统; 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 残留非均匀噪声; 贝叶斯阈值

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0910001

## Adaptive Nonuniformity Correction for IRFPA Based on Bayesian Estimation

Leng Hanbing Xie Qingsheng Liu Wei Yi Bo Tang Linao Zhang Jian

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

**Abstract** After long time working, the response characteristics of infrared focal plane array (IRFPA) often drift slowly, and the image quality always degrades. Aiming at the problem, the characteristic of residual noise after two point correction (TPC) is analyzed. An adaptive non-uniformity correction algorithm is proposed based on the TPC algorithm. The images after TPC is decomposed by wavelet, and the Bayesian threshold is used to estimate signal and noise variance point by point, the residual nonuniformity noise is calculated and removed. Experimental results show that the proposed algorithm can remove the residual nonuniformity noise effectively and avoids the image degradation caused by the response drift of IRFPA.

**Key words** imaging system; infrared focal plane array; non uniformity correction; residual non uniformity noise; Bayesian threshold

**OCIS codes** 100.255; 040.1240; 040.6808

## 1 引言

红外焦平面阵列(IRFPA)是凝视红外成像系统的核心, 其探测元响应的非均匀性是影响成像质量限制系统温度分辨率的重要因素。非均匀性校正技术是提高系统灵敏度和成像质量的重要措施。目前, 国内外常用的非均匀性校正方法主要有基于定标的校正方法、基于场景的校正方法和组合类校正方法<sup>[1]</sup>。

基于定标的校正方法由于其算法简单, 易于用软件或硬件实时实现而在工程项目中被广泛使用。

其缺点是一旦完成定标过程, 其校正系数将被固定, 若各探测元的响应特性发生变化, 用原有的校正系数校正后将带来较大的误差和残余非均匀噪声, 往往需要重新定标才能解决问题。常用的定标校正算法有一点校正(OPC)、两点校正(TPC)、以及多点校正算法<sup>[2]</sup>。基于场景的校正方法是当前算法研究和系统应用的重要方向。场景校正的优点在于能够根据实际场景提取校正系数, 可以克服探测器因温度漂移和时间漂移而带来的响应特性变化, 具有自适应和智能化的优点<sup>[3]</sup>。常用的基于场景的校正算法

**收稿日期**: 2014-03-12; **收到修改稿日期**: 2014-05-04

**基金项目**: 国家自然科学基金(61201376)、中科院西部之光(Y229E21213)

**作者简介**: 冷寒冰(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事红外成像信号处理方面的研究。

E-mail: lenghanbing@opt.ac.cn

包括时域高通滤波算法<sup>[4]</sup>、神经网络算法<sup>[5]</sup>、恒定统计算法等<sup>[6]</sup>。这类算法通常比较复杂,需要大量的系统资源进行长时间的运算,并且对于复杂多变的红外场景,这些校正算法经常会导致“鬼影”的出现,其校正精度和有效性有待深入检验<sup>[7-8]</sup>。

组合类校正方法是定标校正和场景校正的统一,先利用定标校正对 IRFPA 的响应进行初次校正,然后再利用场景对响应特性漂移后导致的非均匀性噪声进行二次校正。该类校正方法主要分为两种:1)一点校正和场景校正的结合;2)两点校正和场景校正的结合。施长城等<sup>[9]</sup>在一点校正的基础上结合神经网络提出了组合校正算法,包含预校正、粗校正和精校正三个步骤。洪闻青等<sup>[10]</sup>在两点校正的基础上采用了自适应滤波校正法来抑制探测器非均匀性参数漂移的影响。本文通过对工程项目中某长波红外相机的图像数据进行分析,在两点校正的基础上提出了一种基于贝叶斯估计的自适应非均匀性校正算法。利用两点定标得到的校正系数对长波红外相机进行初步校正,再利用小波分解和贝叶斯阈值对包含目标和背景的实际场景逐点估算由温度漂移和时间漂移等因素引起的残留非均匀噪声,由两点校正后的图像逐点减去残留非均匀噪声图像即得到最终校正后的图像。在项目中的应用表明,该算法充分发挥了两点校正算法校正精度高的优点,并且在 IRFPA 响应特性发生漂移的情况下能够有效保持图像的成像质量。

## 2 定标校正后残留非均匀噪声分析

在一定的温度范围内,IRFPA 的响应模型通常被近似认为是线性的,表述如下:

$$X(i, j) = K(i, j)\Phi(i, j) + B(i, j), \quad (1)$$

式中  $\Phi(i, j)$  为探测元  $(i, j)$  接收到的场景的辐射通

量,  $K(i, j)$  和  $B(i, j)$  分别为该探测元的增益和偏移量,  $X(i, j)$  为响应输出。当采用两点定标校正时,其模型可表述如下:

$$Y(i, j) = G(i, j)X(i, j) + O(i, j), \quad (2)$$

式中  $X(i, j)$  和  $Y(i, j)$  分别表示探测元  $(i, j)$  校正前和校正后的响应值,  $G(i, j)$  和  $O(i, j)$  分别表示该探测元的增益校正系数和偏移量校正系数。  $G(i, j)$  和  $O(i, j)$  可由如下的公式计算得到:

$$G(i, j) = \frac{\bar{X}_H(i, j) - \bar{X}_L(i, j)}{X_H(i, j) - X_L(i, j)}, \quad (3)$$

$$B(i, j) = \frac{X_H(i, j)\bar{X}_L(i, j) - X_L(i, j)\bar{X}_H(i, j)}{X_H(i, j) - X_L(i, j)}, \quad (4)$$

式中  $X_H(i, j)$  和  $X_L(i, j)$  分别为高温和低温均匀黑体辐射响应值,  $\bar{X}_H(i, j)$  和  $\bar{X}_L(i, j)$  分别为  $X_H(i, j)$  和  $X_L(i, j)$  的均值。

对定标数据而言,两点校正算法最理想的校正效果应该是将所有像元的响应值校正到同一个数值。实际上这是不可能实现的,而只能是将所有像元的响应值尽可能地往同一个响应值拉近。两点校正后的图像仍然存在一定的非均匀性,称之为残留非均匀性。

采用分辨率为  $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的 HgCdTe 长波红外相机分别对  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  的均匀面阵黑体定标,并对  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  的黑体响应数据进行两点校正。图 1 为校正前后的三维(3D)示意图。左图为校正前的三维图像(非均匀性为  $3.35\%$ ),整个响应值构成了一个曲面,存在明显的缓慢起伏和若干尖峰,尖峰所在的点对应了 IRFPA 的盲元。右图为经过两点校正和盲元补偿(BPC)后的三维图,整个曲面被近似校正为一个平面,同时也存在若干尖峰,这些因素导致了残留非均匀性的存在(非均匀性为  $0.866\%$ )。

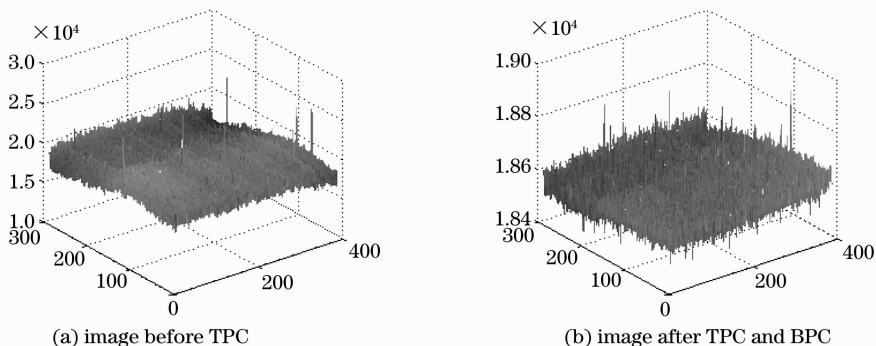


图 1 两点校正前后的三维图像

Fig. 1 Three dimensional (3D) images before and after TPC

残留的非均匀性噪声不是固定不变的,长时间工作后,IRFPA 各探测元的响应特性都会发生漂移,进而导致残留的非均匀噪声增大。图 2 是两点校正后一层小波分解的 4 个系数三维分布图。文献

[11]中提到,未校正的红外图像中,非均匀噪声主要是低频成分。而从图 2 中可以看出,经过了两点校正和盲元补偿之后,残留的非均匀噪声在高频和低频系数都有分布,在高频系数中的分布较大。

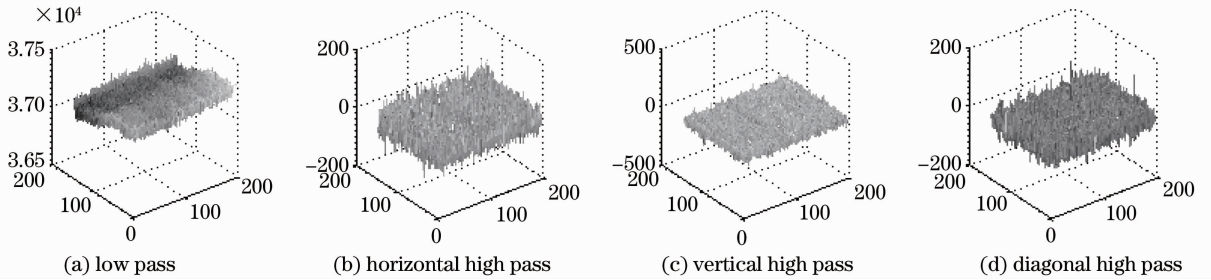


图 2 两点校正后图像一层小波分解后三维图像

Fig. 2 3D representation of the TPC image after 1-level wavelet decomposition

目前的研究已经证明,当 IRFPA 的响应特性发生漂移时,增益校正系数近似保持不变,主要是偏移量校正系数需要相应地进行修正。因此提出如下所示的校正模型:

$$Y(i, j) = G(i, j)X(i, j) + O(i, j) - R(i, j), \quad (5)$$

式中  $G(i, j)$  和  $O(i, j)$  是(2)式中所述的增益校正系数和偏移量校正系数,在定标阶段获得并保持不变, $R(i, j)$  为由场景提取出的残留非均匀噪声,该噪声随着 IRFPA 响应特性的漂移而改变。对于经过两点校正的图像,IRFPA 的响应特性发生漂移时,如果能够估计出每一个探测元的响应漂移量  $R(i, j)$ ,则利用(5)式就可以实现对漂移量的自适应校正。下文基于贝叶斯估计,提出了一种在小波域对残留非均匀噪声进行逐点估计的方法。

关系。因此,第  $K+1(K > 1)$  层小波分解系数中的 1 个点对应第  $K$  层相应空间位置上的 4 个点,对应第  $K$  层相应位置上的 16 个小波系数,并以此类推。并且,同一层不同子带的小波系数间,对应同一空间位置的点,一般可认为具有几乎相同的统计特性。因此只要知道第一层小波分解系数的某个子带内噪声方差分布的情况,就可以由相应的空间位置关系估计出各层各子带的点的噪声方差。

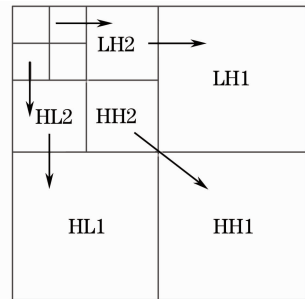


图 3 3 层小波分解的空间尺度

Fig. 3 Spatial dimension of 3-level wavelet decomposition

### 3 基于贝叶斯估计的自适应校正

对残留非均匀噪声进行逐点估计的难点在于如何从每个探测元的响应值中估算出信号分量和噪声分量,在小波系数点上利用贝叶斯阈值进行噪声方差和信号方差的估计是切实可行的途径之一。基于贝叶斯估计的自适应校正方法包括了以下四个步骤:1)残留非均匀噪声方差的逐点估计;2)信号方差的逐点估计;3)逐点贝叶斯阈值和阈值处理;4)逆变换计算出残留非均匀噪声图像并去除。

#### 3.1 残留非均匀噪声方差的逐点估计

双正交线性相位小波滤波器可以保证图像经过多层小波分解后,具有如图3所示的空间尺度对应

通常认为,图像的第一层小波分解的高频系数  $HH^{(1)}$  含有较少的信号能量,可以用于估计噪声的统计特性。考虑到上节中已经对定标数据两点校正后残留的非均匀噪声作了分析,并且得出结论:两点校正后残留的非均匀噪声大部分为高频噪声。因此利用  $HH^{(1)}$  中以该点  $\omega(m, n)$  为中心的一个邻域  $B_n(i, j)$ ,采用文献[12]中使用的绝对中值估计法来估计该点的噪声方差。设  $HH^{(1)}$  中以点  $\omega(i, j)$  为中心,长度为  $2l+1$  的正方形邻域,有如下表示:

$$B_n(m, n) = \begin{bmatrix} \omega_{HH}^{(1)}(m-l, n-l) & \cdots & \omega_{HH}^{(1)}(m-l, n+l) \\ \vdots & \omega_{HH}^{(1)}(m, n) & \vdots \\ \omega_{HH}^{(1)}(m+l, n-l) & \cdots & \omega_{HH}^{(1)}(m+l, n+l) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则点  $\omega^{(1)}(m, n)$  的噪声均方差可以估计如下<sup>[12]</sup>:

$$\hat{\sigma}_{HH}^{(1)}(m, n) = MAD(|\omega_{HH}^{(1)}(m, n)|) / 0.6745, \quad (7)$$

式中  $MAD$  是  $HH^{(1)}$  子带小波系数幅度的中值。对于  $HH^{(1)}$  边缘的点, 可以对称延拓(或周期延拓)  $HH^{(1)}$  后取邻域。邻域的大小可依据噪声的分布特性来取值: 噪声变化缓慢,  $l$  可以取较大的值, 噪声变化快,  $l$  应该取较小的值。

对于同一层的不同子带的小波分解系数, 通常认为其相对应位置上点的噪声均方差是近似相似的, 因此有下式:

$$\hat{\sigma}_{HH}^{(1)}(m, n) \approx \hat{\sigma}_{HL}^{(1)}(m, n) \approx \hat{\sigma}_{HL}^{(1)}(m, n), \quad (8)$$

### 3.2 信号方差的逐点估计

在小波处理领域中, 通常认为信号的小波系数服从广义高斯分布, 信号方差可被看作是一个全局统计量。事实上各子带的小波系数具有很强的空间相关性, 大的小波系数往往集中在一起, 对应于图像的边缘和纹理部分。大多数的小波系数是小的, 对应于图像的光滑区域。因此, 子带内信号的小波系数的能量分布也是空间非均匀的, 也要采用邻域法逐点估计小波系数中信号的方差。

信号对应的数值较大的小波系数总聚在一起, 并且有: 子带内邻近的点包含相近的信息。因此采用子带中以点  $\omega(m, n)$  为中心的方形邻域  $B_s(i, j)$

来估计信号的强度, 即为信号的标准差。噪声强度是随空间位置慢变的, 而图像的细节系数变化较快, 具有明显的空间局部性, 因此通常信号窗要小于噪声窗。信号均方差公式如下:

$$\hat{\sigma}_s^{(k)}(m, n) = \sqrt{\max[\hat{\sigma}_s^{(k)}(m, n)^2, 0]}, \quad (9)$$

$$[\hat{\sigma}_s^{(k)}(m, n)]^2 = \frac{1}{L} \sum \{ |\omega^{(k)}(m, n)|^2 - [\hat{\sigma}^{(k)}(m, n)]^2 \}, \quad (10)$$

不同的分解层, 信号能量的集中和图像的尺寸是不一样的, 估计信号方差时则应该逐渐减小领域, 以取得更加准确的估计。具体窗口的大小应当结合噪声和图像的统计特性来确定。

### 3.3 逐点贝叶斯阈值和阈值处理

求得每个像素点的噪声方差和信号方差后, 逐点贝叶斯阈值函数如下:

$$\lambda^{(k)}(m, n) = [\hat{\sigma}^{(k)}(m, n)]^2 / \hat{\sigma}_s^{(k)}(m, n), \quad (11)$$

(11)式中所描述的阈值处理方式是空间自适应的, 在信号能量集中的区域采用低门限, 倾向于保留信号能量; 在噪声能量高的区域采用高门限, 倾向于剔除噪声能量。按照估计出的每个点的小波系数所对应的门限, 采用软阈值法对子带系数进行逐点 Bayes 阈值处理, 估计图像新的子带系数, 公式如下:

$$\hat{\omega}^{(k)}(m, n) = \text{thresholding}[\omega^{(k)}(m, n), \lambda^{(k)}(m, n)] = \begin{cases} \text{sign}[\omega^{(k)}(m, n)] [|\omega^{(k)}(m, n)| - \lambda^{(k)}(m, n)], & |\omega^{(k)}(m, n)| \geq \lambda^{(k)}(m, n) \\ 0, & |\omega^{(k)}(m, n)| < \lambda^{(k)}(m, n) \end{cases}. \quad (12)$$

### 3.4 残留非均匀噪声的提取

对经过上述步骤处理后的子带系数进行逆小波变换, 假设得到的图像为  $Z(i, j)$ , 则残留非均匀噪声由下式得出:

$$R(i, j) = G(i, j)X(i, j) + O(i, j) - Z(i, j). \quad (13)$$

由于 IRFPA 响应特性的漂移是一个缓变的过程, 因此由相邻的若干帧分别提取出的残留非均匀噪声可认为是近似相等的。在实时性要求高的场合下, 可以每隔若干帧进行一次残留非均匀噪声的提取。

## 4 实验结果与分析

为验证本文提出算法(Baye-NUC)的性能, 在  $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  大小的 HgCdTe 长波红外成像系统中对该算法进行了试验, 并与文献[10]中提出的自适应滤波(AF-NUC)校正方法进行了对比。该成像系统安装于某地, 用于对天基目标进行昼夜持续监视和跟踪, 其长波红外相机在经过盲元补偿和两点校正后, 处于长时间连续工作状态。图 4(a)~(d)分别为经过 2、3、4 和 5 h 后的成像图; 图 4(e)~(h)为文献[10]中自适应滤波的校正结果, 图 4(i)~

(1)为本文算法的校正结果。算法中使用的小波为 db1 小波,采用了一层分解,估计噪声方差时的窗口为  $11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$ ,估计信号方差时的窗口大小为  $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 。粗糙度常用来评价基于场景的非均匀校正算法的性能,图 5 给出了这两种算法处理

后粗糙度的对比图。其中,横坐标为图像序列的帧数,纵坐标为校正后图像的粗糙度。提出的算法有效降低了图像的粗糙度,与 AF-NUC 校正算法相比具有更好的校正效果。

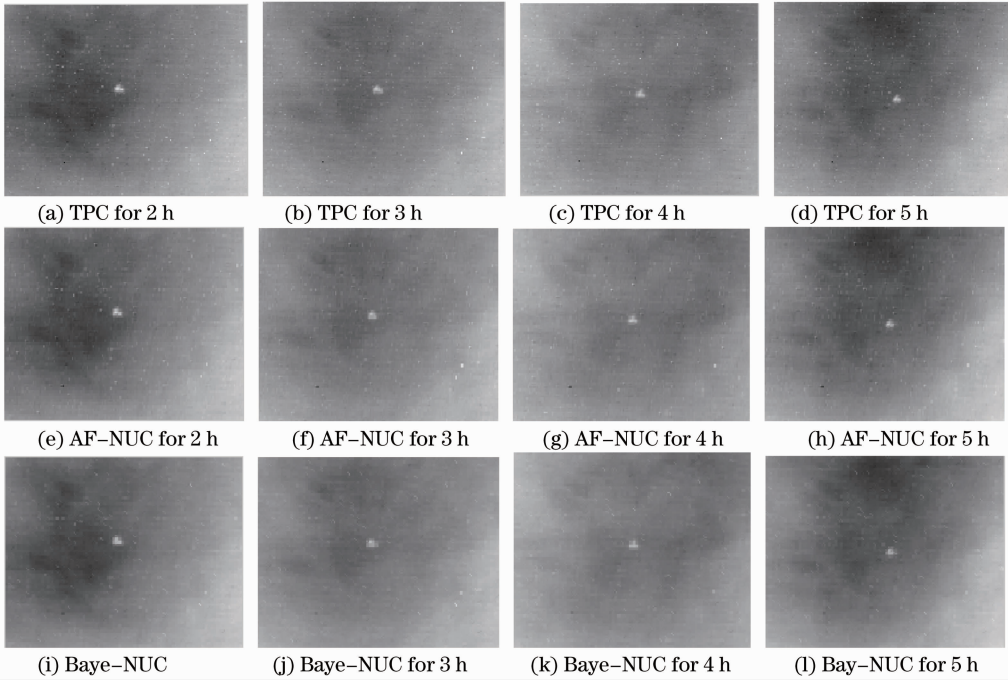


图 4 算法实验结果

Fig. 4 Experimental results of proposed algorithm

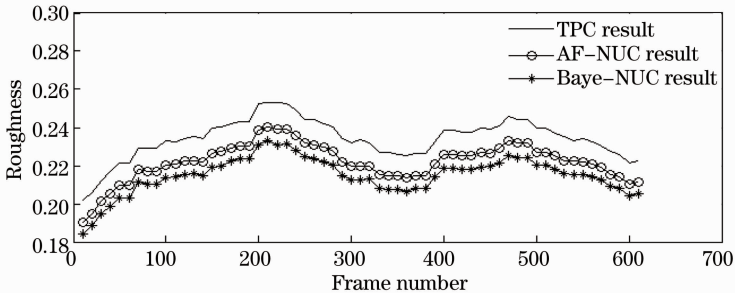


图 5 不同算法的粗糙度

Fig. 5 Roughness of different algorithms

## 5 结 论

分析了两点校正后残留非均匀噪声的特性,提出了一种基于场景的自适应非均匀性校正算法。该算法在两点定标校正算法的基础上,利用贝叶斯阈值对残留的非均匀噪声进行自适应估计,从而消除因 IRFPA 探测元响应特性漂移而导致的不良影响,进一步提升了校正精度,增强了校正算法的环境适应性。实验结果验证了该算法的有效性。

## 参 考 文 献

- 1 Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian. Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1617–1620.  
秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾. 小波变换的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1617–1620.
- 2 Liu Xiu, Jin Weiqi, Xu Chao. High-resolution reconstruction and non-uniformity correction from images sequences based on poisson-markov model MAP [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(9): 2103–2107.  
刘秀, 金伟其, 徐超. 基于 MPMAP 序列红外图像高分辨力重建和非均匀性校正[J]. *电子学报*, 2011, 39(9): 2103–2107.
- 3 Weixian Qian, Qian Chen, Guohua Gu, *et al.*. Correction

- method for stripe nonuniformity [J]. Appl Opt, 2010, 49(10): 1764–1773.
- 4 Lixiang Geng, Qian Chen, Weixian Qian, *et al.*. Scene-based nonuniformity correction algorithm based on temporal median filter [J]. J Opt Soc Korea, 2013, 17(3): 255–261.
- 5 R C Hardie, F Baxley, B Brys, *et al.*. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. Opt Express, 2009, 17(17): 14918–14933.
- 6 A Rossi, M Diani, G Corsini. Temporal statistics de-ghosting for adaptive non-uniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. Electron Lett, 2010, 46(5): 348–349.
- 7 Chao Zuo, Yuzhen Zhang, Qian Chen, *et al.*. A two-frame approach for scene-based nonuniformity correction in array sensors [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60(5): 190–196.
- 8 Xiubao Sui, Qian Chen, Guohua Gu. Adaptive grayscale adjustment-based stripe noise removal method of single image [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60(4): 121–128.
- 9 Shi Changcheng, Zhang TianXu, Liu Huina, *et al.*. Combinational algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane array [J]. J Infrared Millim Waves, 2010, 29(1): 23–26.
- 施长城, 张天序, 刘慧娜, 等. 一种红外焦平面非均匀性组合校正算法[J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(1): 23–26.
- 10 Hong Wenqing, Yang Nansheng, Wang Xiaodong, *et al.*. Combined nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0611005.
- 洪闻青, 杨南生, 王晓东, 等. 红外焦平面联合非均匀性校正算法[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0611005.
- 11 Zhang Tianxu, Shi Yan, Cao Zhiguo. Study on the property of spatial frequency of non-uniformity noise in IRFPA and the improvement of spatial adaptive nonuniformity of spatial adaptive non-uniformity correction technique [J]. J Infrared Millim Waves, 2005, 24(4): 255–260.
- 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[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 255–260.
- 12 D L Donoho, I M Johnstone. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425–455.

栏目编辑: 张浩佳