

## 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正方法

刘 慧<sup>1</sup>, 朱明超<sup>1</sup>, 吴泽鹏<sup>2</sup>, 郭玲玲<sup>2</sup>, 赵其昌<sup>2</sup>, 贾宏光<sup>1</sup>, 宣 明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

**摘 要:** 分析基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正方法中的景物退化和鬼影现象, 提出了一种基于边缘约束高斯滤波的红外焦平面阵列非均匀性自适应校正方法。该方法设计了一个边缘约束高斯滤波器来获取理想的估计图像, 利用最陡下降法得到计算增益校正因子和偏移量校正因子的迭代公式, 并通过迭代步长的自适应控制来增快算法的收敛速度。通过仿真实验和真实红外图像处理对比实验表明: 相较于目前已有的方法, 该方法在有效抑制景物退化和鬼影现象的同时, 较好地去除原始红外图像的固定图案噪声, 保留了图像细节信息, 提高了图像质量。

**关键词:** 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 鬼影现象

**中图分类号:** TN21; TN215   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1364-06

## Adaptive nonuniformity correction method for infrared focal plane arrays

Liu Hui<sup>1</sup>, Zhu Mingchao<sup>1</sup>, Wu Zepeng<sup>2</sup>, Guo Lingling<sup>2</sup>, Zhao Qichang<sup>2</sup>, Jia Hongguang<sup>1</sup>, Xuan Ming<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The scene degradation and ghosting in scene-based nonuniformity correction methods for infrared focal plane arrays were analyzed here, and a novel approach based on Gaussian filtering with edge constraint was proposed for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays. A Gaussian filter with edge constraint was designed to obtain the desired estimation of the image. The gain and offset correction factors in the iterative formula were calculated using the steepest descent method. Meantime, the convergence speed was increased through adaptive control of the iterative step. Both simulation and experiments on real infrared images demonstrate that this approach can remove the fixed pattern noise more effectively compared with the existing methods. It can effectively suppress the scene degradation and ghosting, retain the detailed image information, and improve the image quality.

**Key words:** infrared focal plane arrays; nonuniformity correction; ghosting

收稿日期: 2013-09-12; 修订日期: 2013-10-13

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重要项目(YYYJ-1122)

作者简介: 刘慧(1983-), 男, 助理研究员, 主要从事红外成像系统方面的研究。Email: LiuH6009@163.com

## 0 引 言

红外焦平面阵列器件(IRFPA)是当前技术性能先进的红外探测器<sup>[1-2]</sup>,它在红外跟踪、预警、制导等领域都有广泛的应用。由于制造工艺的限制,IRFPA各探测元的响应度不一致,导致生成的图像存在叠加的固定图案噪声(FPN),且 FPN 随着时间和环境变化缓慢漂移。为此,需将存在噪声影响的原始图像进行非均匀性校正(NUC)得到一个高质量的去噪图像。

国内外的非均匀性校正方法主要有两个思路:基于黑体标定(BBNUC)和基于场景的非均匀性校正(SBNUC)。BBNUC 方法中最为常用的是两点标定法(TPC)。尽管 BBNUC 方法的准确度是最高的,但是需周期性地重新标定,为实际工作带来不便。基于场景的非均匀性校正方法无需黑体标定,能克服 BBNUC 方法的缺点。SBNUC 的方法得到了广泛的研究:假设各探测元输出的一阶统计量和二阶统计量相同,M. M. Hayat<sup>[3-4]</sup>提出了恒定统计的 NUC 校正;通过最小化观察图像和估计图像的差值实现图像的非均匀性校正<sup>[5]</sup>,D. A. Scribner<sup>[6]</sup>提出了基于神经网络的 LMS 算法(NN-NUC),参考文献[7]通过自适应步长设置,加快了收敛速度(FA-NUC),Russell C. Hardie<sup>[8]</sup>又做了进一步总结。得益于全变分(TV)算法在图像去噪中的应用,Esteban Vera<sup>[9]</sup>提出了基于全变分的 NUC 算法(TV-NUC)。若不考虑增益因子的影响,Bradley M. Ratliff<sup>[10]</sup>提出了代数类的方法。上述非均匀校正方法在一定环境下能得到较好的实验效果,但是,不可避免的,上述基于场景的非均匀性校正方法均存在较强的鬼影现象和目标景物退化<sup>[11-12]</sup>等问题。

在详细分析红外焦平面阵列非均匀性校正过程中鬼影现象和目标退化问题产生的原因后,提出了一种改进的基于 LMS 算法的红外焦平面阵列非均匀性校正方法。该方法在得到较好的非均匀性校正效果的同时,有效地解决了图像的鬼影现象以及景物退化的问题。最后通过仿真实验及真实红外外场景分析验证了此结论。

## 1 基本原理

### 1.1 IRFPA 非均匀性校正模型

尽管红外焦平面阵列中探测器的输出与相应激

励是非线性的,但在某一时间段内通常可以用线性模型来近似表示。

$$Y_{ij}(n) = A_{ij}X_{ij}(n) + B_{ij} \quad (1)$$

式中:(i,j)表示探测元的位置;n 可视为时刻 n 或者视频的第 n 帧; $X_{ij}(n)$ 表示时刻 n 位于(i,j)探测元的辐射照度; $Y_{ij}(n)$ 为从探测元对应的输出值; $A_{ij}$ 和  $B_{ij}$ 为探测位于(i,j)探测元的非均匀性增益量因子和偏移量因子。

非均匀性校正的算法是通过探测器的读出值  $Y_{ij}(n)$  以及计算或者估计得到的系数  $\hat{A}_{ij}$  和  $\hat{B}_{ij}$  来获取真实的红外辐射照度  $\hat{X}_{ij}(n)$ 。其非均匀性校正模型为:

$$\hat{X}_{ij}(n) = \hat{G}_{ij}(n)Y_{ij}(n) + \hat{O}_{ij}(n) \quad (2)$$

其中,  $\hat{G}_{ij}(n) = \frac{1}{\hat{A}_{ij}}$ ,  $\hat{O}_{ij}(n) = \frac{-\hat{B}_{ij}}{\hat{A}_{ij}}$ 。

### 1.2 基于 LMS 的非均匀性校正方法

经典的基于 LMS 的非均匀性校正方法,首先由 Scribner 提出,其流程图如图 1 所示。

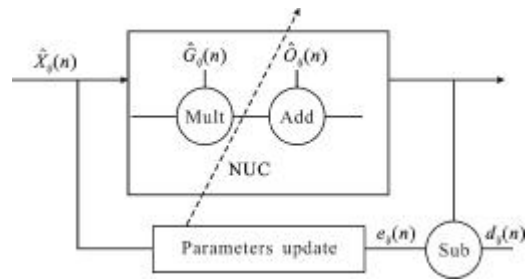


图 1 LMS 非均匀性校正原理框图

Fig.1 Block-scheme of LMS-based NUC method

其中  $d_{ij}(n)$  为  $X_{ij}(n)$  的期望估计,而实际上真实无 FPN 的图像不可获知,因此在实验中只能选取其估计值。经典的方法把探测元的邻域像素点通过线性空间滤波器(低通滤波,高斯滤波等)来获取期望  $d_{ij}(n)$ 。若以  $f$  表示线性空间滤波器,则有:

$$d_{ij}(n) = f(y_{ij}(n)) \quad (3)$$

在获取期望校正值后,可定义校正误差  $e_{ij}(n)$  为:

$$e_{ij}(n) = \hat{X}_{ij}(n) - d_{ij}(n) = \hat{G}_{ij}(n)Y_{ij}(n) + \hat{O}_{ij}(n) - d_{ij}(n) \quad (4)$$

为最小化  $e_{ij}(n)$  的均方误差,根据最陡下降法,得到如下的增益校正因子和偏移量校正因子的迭代公式:

$$\begin{aligned} G_{ij}(n+1) &= G_{ij}(n) - \eta e_{ij}(n) Y_{ij}(n) \\ O_{ij}(n+1) &= O_{ij}(n) - \eta e_{ij}(n) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\eta$  表示步长;  $n$  表示图像序列的位序。

### 1.3 鬼影和景物退化现象分析

1.2 节中所述的基于 LMS 的非均匀性校正方法在一定条件下都能得到较好的效果,但在实验过程中容易产生较强的鬼影和景物退化现象。其根本原因则是对理想图像  $d_{ij}(n)$  的估计不够准确。在非均匀性校正过程中,将某处的场景错误地检测为图像的固定图案噪声。而产生错误检测的原因有:(1) 场景运动速度慢;(2) 图像的高频成分大。

从公式(5)可知:当场景的运动速度较慢时,增益校正因子和偏移量校正因子的迭代公式中  $Y_{ij}(n)$  变化非常缓慢,而此时固定图案噪声很难和场景有明显的区分;若图像的高频成分大,则图像的边缘非常明显,  $e_{ij}(n)$  的计算值将相比平坦区域大,增大了边缘区域的更新步长,故而产生较强的鬼影现象。

适当减小步长  $\eta$  的值是解决上述问题的办法之一。当  $\eta$  减小时,鬼影和景物退化现象能够得到一定的抑制,但是同时也导致了其收敛速度降低。参考文献[8]通过自适应步长的设置,  $\eta$  的值不再是一个固定的数,而是探测元周围区域数值的均值和方差来确定步长。该方法对于增快收敛速度有一定的作用,但是仍然存在两个问题:(1) 景物退化和鬼影问题没有得到彻底的解决(处理结果见第 3 节);(2) 因涉及图像均值和方差的计算,算法的计算复杂度提高了,给嵌入式系统中实现增加了困难。

## 2 基于边缘约束高斯滤波器的红外焦平面非均匀性校正方法

线性空间滤波器中,高斯滤波相对均值滤波等其他滤波方式更能侧重于保持图像的固有特性。但是由于高斯滤波对整个图像采用相同的模板,不能解决 1.3 小节中的鬼影和图像退化的问题。故而,算法的关键在滤波器的重新设计和迭代算法的步长控制上。

### 2.1 边缘约束高斯滤波器设计

构造获得图像理想期望的滤波处理过程为:

$$d_{ij}(n) = \frac{\sum_{p=-M}^M \sum_{k=-M}^M w(i, j, p, k) \times \hat{X}(i-p, j-k)}{\sum_{p=-M}^M \sum_{k=-M}^M w(i, j, p, k)} \quad (6)$$

式中:  $M$  为作用区域大小;  $w$  定义为边缘约束高斯滤

波器,

$$w(i, j, p, k) = w_g(p, k) \times w_e(i, j, p, k) = \exp\left(-\frac{p^2+k^2}{2\sigma^2}\right) \times \frac{1}{\left(\frac{\hat{X}(i, j) - \hat{X}(i-p, j-k)}{L_{\text{norm}}}\right)^2 + 1} \quad (7)$$

式中:  $w_g(p, k)$  表示高斯滤波,  $w_e(i, j, p, k)$  为可自适应保留图像边缘的函数;  $L_{\text{norm}}$  为归一化因子。为直观分析  $w_e$  函数的性质,不妨先分析函数  $f(x) = \frac{1}{x^2+1}$ : 当  $x$  趋于零时,函数分母的值主要由 1 值决定,  $f(x)$  趋向于 1; 当  $x$  大于 1 的数倍时,函数分母的值由  $x$  决定,函数值接近  $1/x^2$ 。从图 2(函数  $f(x)$  的曲线图)亦能验证上述结论。

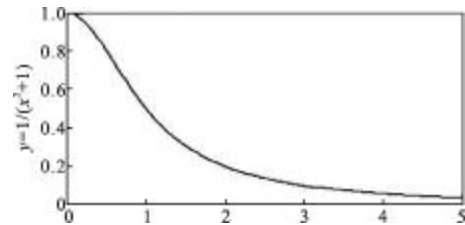


图 2 函数  $f(x)$  的曲线图

Fig.2 Graph of  $f(x)$

根据上述结论分析公式(7)的滤波器:当高斯滤波作用在图像的平坦区域时,  $w_e$  的值趋于 1; 当滤波器作用区域的值与中心点相差较大,即场景的边缘处,滤波器  $w_e$  能够抑制高斯滤波器的权重。故而,通过该滤波器获取理想期望图像时,相对于传统方法,在仅仅增加较小计算量的情况下,保留图像的边缘细节。

### 2.2 迭代公式的步长设计

固定的迭代步长不能随着非均匀性的失真而自动调整大小,使得校正结果不够理想。采用可变步长能够较好地增加收敛速度及抑制鬼影现象。该类算法的基本指导思想是:区域平坦时采用较大的步长;区域纹理信息丰富时减小步长。从 2.1 小节得知,设计的边缘约束的高斯滤波器中公式(7)第二项  $w_e$  能够根据图像的纹理变化情况自适应调整权值大小,故而采用该算子的权值作为文中算法的自适应步长控制因子:

$$\eta_{ij}(n) = \sum_{p=-M}^M \sum_{k=-M}^M w_e(i, j, p, k) \quad (8)$$

采用公式(8)作为公式(5)中增益校正因子和偏

移量校正因子的迭代公式的迭代步长自动设置方法,在几乎不增加运算量的情况下,提高了算法的收敛速度,并满足上文提出的自适应步长设计指导思想。

### 2.3 基于边缘约束高斯滤波器的非均匀性校正方法

基于边缘约束高斯滤波器的校正方法基本流程如图 3 所示。相对于经典的基于 LMS 的校正方法改进主要在 3 点:

(1) 采用重新设计的边缘约束高斯滤波器代替原来的低通线性滤波器预测理想期望。有效抑制了经典的红外焦平面阵列非均匀性校正中的鬼影和景物退化现象。

(2) 采用校正后的图像计算探测器输入的期望值。当探测器非均匀性比较严重时,若采用原始探测器输出计算期望值仍然会有较强的非均匀性,收敛后的图像非均匀性也非常不好。而采用校正后图像来计算期望值,期望值中的非均匀性会不断减小,最终达到理想的效果。

(3) 采用了一个自适应步长控制方法,该方法几乎不增加任何运算量。

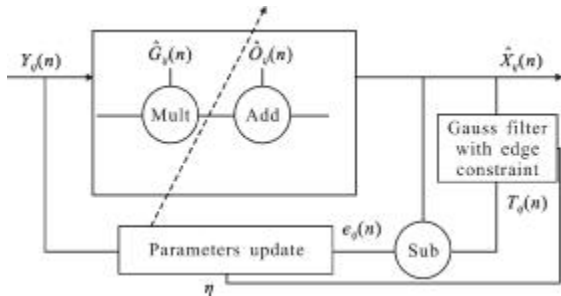


图 3 基于边缘约束高斯滤波器的非均匀性校正方法的基本流程

Fig.3 Block-scheme of NUC method based on Gauss filter with edge-constraint

### 3 实验结果及对比

为了验证算法的有效性,分别对仿真数据和实际的红外图像序列进行处理,并与 NN-NUC、FA-NUC 算法,以及参考文献[9]中提出的 TV-NUC 做对比。选择 NN-NUC、FA-NUC 因为其都是基于神经网络的经典方法,无需运动估计即可实现非均匀性校正。而 TV-NUC 对于固定图案噪声具有很好的去除效果。

为了客观分析图像的非均匀校正效果,在能够

获取准确的校正图像的条件下,使用均方误差(RMSE)和峰值信噪比(PSNR)作为评价指标。若未能确定完全去除 FPN 的图像时,可采用图像光滑度  $\rho$  作为评价指标。假定  $X$  和  $\hat{X}$  分别为原始图像和非均匀校正后的图像,  $b$  为图像的灰度级,则均方误差和峰值信噪比定义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_i^M \sum_j^N (X - \hat{X})^2} \quad (9)$$

$$PSNR = 20 \log \left( \frac{2^b}{RMSE} \right) \quad (10)$$

图像光滑度  $\rho$  定义如下:

$$\rho(\hat{X}) = \frac{\|h_1 \cdot \hat{X}\|_1 + \|h_1^T \cdot \hat{X}\|_1}{\|\hat{X}\|_1} \quad (11)$$

式中:  $h_1 = [1, -1]$  为水平模板;  $h_1^T$  为垂直模板;  $\|\cdot\|_1$  表示矩阵的 L1 范数,值越小,图像效果越好

### 3.1 仿真结果及讨论

利用两点标定法得到的红外图像序列(假设其已经完全去除了固定图案噪声),参考文献[10]在此视频上叠加人为设定的固定图案噪声。仿真中模拟 IRFPA 的非均匀性增益因子为均值 1.0、标准差设置为 0.15 的高斯分布;偏置因子则是均值为 0,标准差为 5.0 的高斯分布。图 4 为经过 500 帧后,4 种算法处理得到的图像,表 1 为对应的客观评价指标。

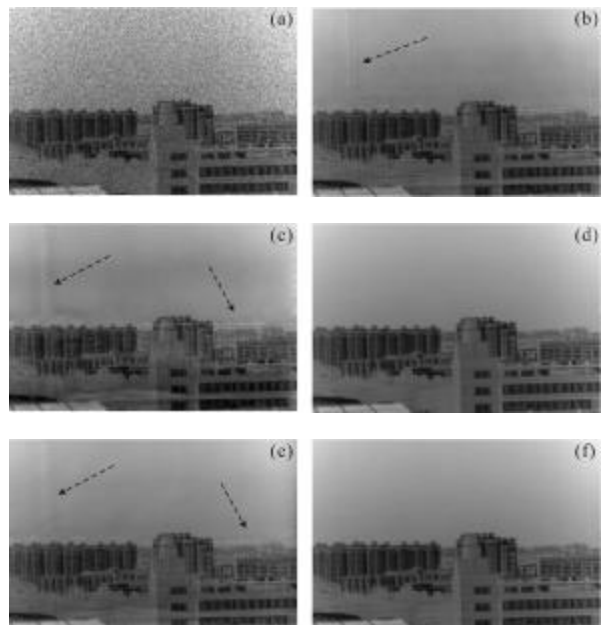


图 4 非均匀校正算法对仿真数据的处理结果

Fig.4 NUC results on simulated FPN

表 1 客观指标对比表

Tab.1 Comparison of evaluation indexes for simulated data

Method	Original image	Corrupted image	NN-NUC	FA-NUC	TV-NUC	Proposed method
RMSE	0	27.213 6	12.256 5	9.588 0	8.564 7	7.428 9
PSNR /dB	$+\infty$	19.435 1	26.363 5	28.496 2	29.476 5	30.712 3
$\rho$	0.111 8	0.529 6	0.223 7	0.153 3	0.149 7	0.119 7

从图 4 中可以看出,被 FPN 污染的图像(a)相对原始的图像(d)清晰度下降很大。根据实验结果可知,4 种处理方法都具有一定的固定图案噪声去除能力。图像的清晰度得到较大的提高,但是从图 4 可以看出,NN-NU、FA-NUC 以及 TV-NUC 算法在非均匀校正都存在不同程度的鬼影和场景退化情况(如图(b)(c)(e)箭头所示),而文中方法则完全避免了图像了上述情况。根据表 1 所列的校正后图像客观指标得知,文中算法得到的实验结果明显优于其他典型算法。

以上叙述的比较仅仅是从一帧图像上比较几种算法的性能,为更加客观全面地分析算法的性能,计算了从非均匀校正开始至第 1000 帧图像的信噪比和图像平滑度,其结果如图 5 和图 6 所示,从图 5 或图 6 均可看出,文中算法较其他 3 种算法的收敛速度更快,且最终得到图像的信噪比更高,图像质量更好。

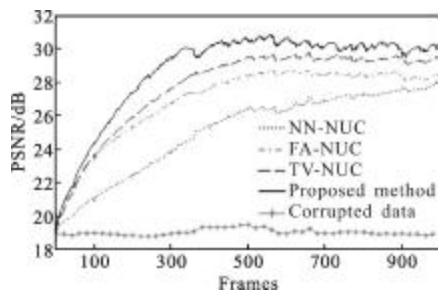


图 5 图像序列的峰值信噪比

Fig.5 PSNR of an infrared video sequence

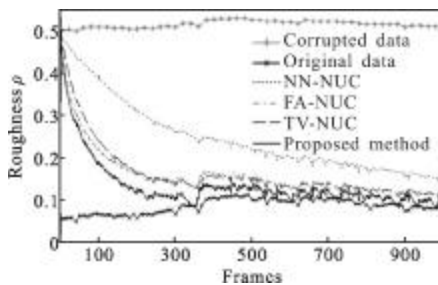


图 6 图像序列的平滑度

Fig.6 Roughness of an infrared video sequence

### 3.2 真实红外图像处理结果

为更加全面地比较算法的性能,对实际存在固定图案噪声的红外图像分别使用不同算法进行了处理。结果如图 7 所示,图 7(a)-(c)正下方的数值表示图像的平滑度(公式(11)定义)。由于未被固定图形噪声污染的准确图像实际未知,此小节不计算图像的 PSNR 和 RMSE。

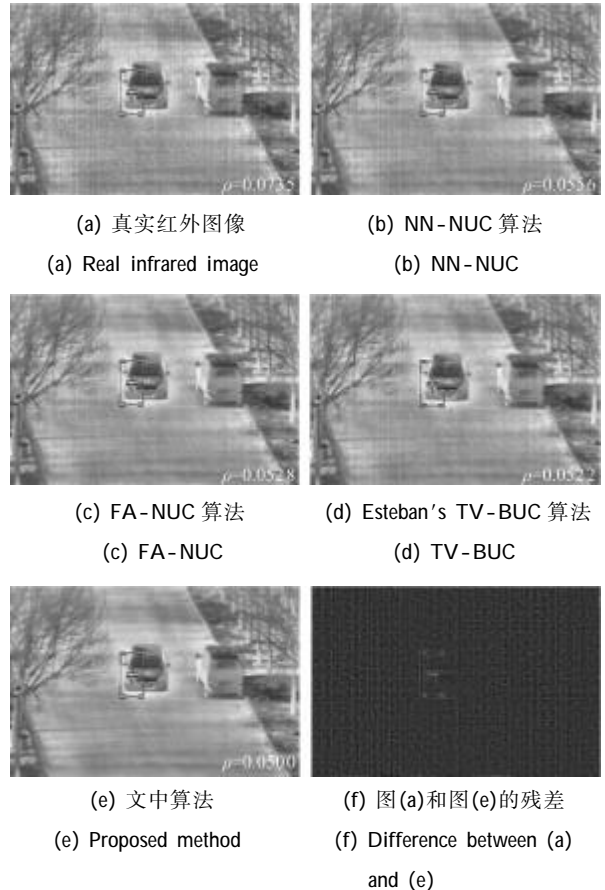


图 7 非均匀校正算法对真实数据的处理结果

Fig.7 NUC result on real infrared image

从图 7 图像及其各图下方的客观指标可知,4 种非均匀性校正方法一定程度上都能去除红外原始图像的固定图案噪声。无论从实际显示效果还是客观指标平滑度参数  $\rho$ ,文中提出的方法都明显优于其他 3 种经典方法。另外,图 7(f)表示经过文中算法处理的图像图(e)与原始未经校正的红外图像图(a)的残差,从残差可知,文中方法在几乎没有出现任何景物退化的情况下,较好地去除了图像的固定图案噪声。

## 4 结论

在深入分析基于场景的红外焦平面阵列非均匀

性校正方法中的场景退化和鬼影现象产生的原因后,设计了基于边缘约束高斯滤波的红外焦平面阵列非均匀性自适应校正方法。设计的边缘约束高斯滤波器相对传统的滤波方法能够获得更为合理的期望图像,并在几乎不增加运算量的前提下,设计了迭代步长的自适应控制方法,加快了算法的收敛速度。分别通过仿真合成的固定图案噪声图像序列和真实的红外场景图像序列证明:该方法几乎不存在图像的景物退化和鬼影现象,在有效去除红外图像中的固定图案噪声的同时,保留了图像的细节信息。该方法无论直观效果还是客观评价指标都优于现有的典型 NUC 校正方法。

#### 参考文献:

- [1] Xu Tianhua, Zhao Yigong. Analysis of scene-based techniques for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2004, 23 (4): 257-261. (in Chinese)  
徐田华, 赵亦工. 基于场景的红外焦平面非均匀校正技术分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, 23(4): 257-261.
- [2] D Pipa, E da Silva, C Pagliari, et al. Recursive algorithms for bias and gain nonuniformity correction in infrared videos [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21 (12): 4758-4769.
- [3] Hayat M M, Torres S N, Armstrong E, et al. Statistical Algorithm for Nonuniformity Correction in Focal-plane Arrays[J]. *Applied Optics*, 1999, 38 (5): 772-7803.
- [4] Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. *The Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(3): 470-480.
- [5] Qian Weixian, Chen Qian, Gu Guohua. Minimum mean square error method for stripe nonuniformity correction [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(5): 051003-1-051003-3.
- [6] Scribner D A, Sarkady K A, Krueer M R, et al. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks[C]//SPIE, 1991, 1541: 100-109
- [7] Esteban Vera, Sergio Torres. Fast adaptive nonuniformity correction for infrared focal-plane array detectors [J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2005, 13: 1994-2004.
- [8] Hardie Russell C, Frank Baxley, Brandon Brys. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (17): 14918-14933.
- [9] Esteban Vera, Pablo Meza, Sergio Torres. Total variation approach for adaptive nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 172-174.
- [10] Ratliff Bradley M, Hayat Majeed M, J Scott Tyo. Generalized algebraic scene-based nonuniformity correction algorithm [J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22(2): 239--249.
- [11] Bai Junqi, Chen Qian, Qian Weixian, et al. Ghosting reduction in scene-based nonuniformity correction of infrared image sequences [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(12): 1113-1116.
- [12] Alessandro Rossii, Marco Diani, Giovanni Corsini. Bilateral filter-based adaptive nonuniformity correction for infrared focal-plane array systems [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(5): 057003-1-057003-13.