

doi: 10.3788/gzxb20154404.0410001

时空域非线性滤波红外序列图像 非均匀性校正

李佳^{1,2}, 秦翰林¹, 延翔¹, 周慧鑫¹, 曾庆杰¹, 韩姣姣¹, 马静因², 吕恩龙¹, 刘上乾¹

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 空军工程大学 理学院, 西安 710051)

摘要:针对现有非均匀性校正方法中校正结果收敛速度慢、图像退化、存在“鬼影”现象等问题,提出一种空域三边滤波与时域梯度加权均值滤波相结合的红外序列图像非均匀性校正方法.该方法首先利用三边滤波将图像分解为基本分量与细节分量;然后对分离出的细节分量序列图像的时域曲线进行梯度加权均值滤波,从而分离出细节分量中非均匀性和场景细节;最后用原图减去非均匀性,得到校正结果.实验结果表明,该方法能有效地抑制“鬼影”并改善图像退化现象,校正结果无论主观视觉还是客观评价指标均明显优于时域高通与神经网络校正方法.

关键词:红外焦平面阵列;非均匀性校正;三边滤波;时域曲线;鬼影

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)04-0410001-5

Temporal- Spatial Nonlinear Filter Based Non-uniformity Correction Method for IR Image Sequence

LI Jia^{1,2}, QIN Han-lin¹, YAN Xiang¹, ZHOU Hui-xin¹, ZENG Qing-jie¹,

HAN Jiao-jiao¹, MA Jing-nan², LÜ En-long¹, LIU Shang-qian¹

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To solve the problems of slow convergence, ghosting and scene degradation in non-uniformity correction methods, a non-uniformity correction method based on trilateral filter and gradient weighted average filter was introduced. Firstly, trilateral filter was used to decompose the image into basic component and detailed component. Then, in order to decompose the scene details and the non-uniformity of detailed component, image sequence of detail components were filtered by weighted average filter. Finally, the corrected result could be obtained through subtracting non-uniformity from the original image. The experimental results show that the method can significantly suppress the ghosting and the scene degradation. The results of correction are superior to the THPF-NUC and NN-NUC in the aspects of subjective visual and objective evaluation index.

Key words: Infrared focal plane array; Non-uniformity Correction; Trilateral filter; Temporal curve; Ghosting

OCIS Codes: 100.2550;100.3080;100.4997

0 引言

红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Arrays,

IRFPA)由于其具有高灵敏度和高帧频的特点被广泛应用于高性能的红外探测系统中.但由于探测器制造工艺、读出电路等方面的限制,探测系统在成像时产生

基金项目:国家自然科学基金(No.61401343)、航空基金(No.20120181005)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(Nos.7214571801、7214526302、7214571802、7214481002、7214527802、K5051305004)资助

第一作者:李佳(1977-),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为光电成像信号处理与自动目标识别. Email:lijia@stu.xidian.edu.cn

通讯作者:秦翰林(1982-),男,副教授,博士,主要研究方向为计算光谱成像和智能感知. Email:hlqin@mail.xidian.edu.cn

收稿日期:2014-09-30; **录用日期:**2014-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

的非均匀性会对红外探测系统的性能产生严重制约,因此必须进行非均匀性校正(Non-uniformity Correction, NUC)^[1-2].

目前非均匀性校正方法主要有基于参考辐射源和基于场景两大类.基于参考源的方法有一点校正、两点校正及多点校正等^[3-5].此类方法原理简单,易于实现,但工作时需要用参考辐射源周期性地停机来校正参量漂移,给实际应用带来不便.基于场景自适应的校正方法主要包括时域高通滤波(Temporal High-pass Filter, THPF)^[6]、神经网络(Neural Networks, NN)^[7-8]等方法.针对这些方法存在的问题,一些新的校正方法被提出^[9-12],虽然取得了较好的校正效果,但仍然存在迭代收敛速度慢、图像退化与“鬼影”等主要问题.

针对非均匀性校正方法中存在的问题,本文引入了一种时空域非线性滤波相结合的红外序列图像非均匀性校正方法.该方法在时域上采用梯度加权均值滤波,突破了非均匀校正方法需要大量序列图像迭代进行校正的传统思路,仅用相邻的几帧图像即可达到良好的校正效果;同时,该方法在空域上采用三边滤波分离图像中的场景与细节分量,有效地抑制了“鬼影”及图像退化现象.

1 基于三边滤波的红外图像基本分量与细节分量分离

Choudhury等在双边滤波的基础上提出了三边滤波^[13](Trilateral Filter, TF),三边滤波模型除了利用图像中像素点的空间位置和亮度信息外,又引入了图像的梯度信息,因此,它在滤波时能够更好地保护图像场景中的非阶跃型边缘和纹理等细节信息.

三边滤波改变了双边滤波矩形的滤波窗口,使用倾斜的滤波窗口,其倾斜角度为 θ ,则倾斜向量为

$$G_{\theta}(x) = \sum_{\tau} \nabla f_{in}(x+\tau) S(\tau) \cdot P(\|\nabla f_{in}(x+\tau) - \nabla f_{in}(x)\|) \quad (1)$$

式中, τ 为以像素 x 为中心的邻域, S 是距离度量函数, P 是灰度相似性度量函数. f_{in} 表示图像当前值, $k_{\theta}(x)$ 为归一化函数, $k_{\theta}(x) = \frac{1}{k_{\theta}(x)} \sum_{\tau} S(\tau) P(\|\nabla f_{in}(x+\tau) - \nabla f_{in}(x)\|)$, $\nabla f_{in}(x)$ 为图像的梯度,可表示为

$$\nabla f_{in}(m, n) = (f_{in}(m+1, n) - f_{in}(m, n), f_{in}(m, n+1) - f_{in}(m, n)) \quad (2)$$

使用倾斜滤波窗口,根据倾斜角度 $G_{\theta}(x)$ 计算每一个像素 x 邻域内每一个像素 τ 的估计值,结果为

$$L(x, \tau) = f_{in}(x) + G_{\theta}(x) \cdot \tau \quad (3)$$

则邻域内每个像素点的更新值为

$$f_{\Delta}(x, \tau) = f_{in}(x+\tau) - L(x, \tau) \quad (4)$$

对像素点 x 进行三边滤波得

$$f_{out}(x) = f_{in}(x) + \frac{1}{k_{\Delta}(x)} \sum_{\tau} (f_{\Delta}(x, \tau) S(\tau) \cdot$$

$$P(f_{\Delta}(x, \tau)) h_{\theta}(x, \tau)) \quad (5)$$

式中 $k_{\Delta}(x) = \sum_{\tau} (S(\tau) P(f_{\Delta}(x, \tau)) f_{\Delta}(x, \tau))$, $h_{\theta}(x, \tau)$ 用来检测邻域内的点与 x 点的梯度差异,若差异过大,则在对 x 点滤波时可忽略该点.

对一幅含有非均匀性的图像进行三边滤波,可以将图像分解为包含大部分场景信息的基本分量和包含图像非均匀性及场景细节的细节分量.图1给出了三边滤波对一幅包含弱小目标的红外图像的分解结果,从图1(c)可以看出,虽然三边滤波在场景边缘及细节保持方面较其他平滑滤波方法有更好的性能,但在分离出的细节分量中除了图像的非均匀性,仍包含了原图像中的一部分边缘细节以及弱小目标等重要信息,若利用这样的细节分量直接进行非均匀性校正,势必会造成图像细节的退化,甚至弱小目标主要信息的丢失.因此,为了得到更好的校正效果,必须将细节分量中的非均匀性与场景细节有效分离.

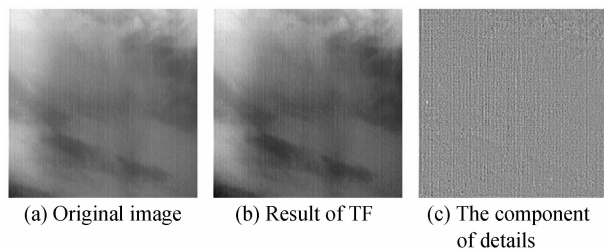


图1 三边滤波结果

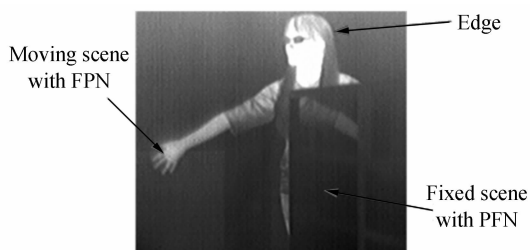
Fig.1 Result of TF

2 基于三边滤波与梯度加权均值滤波的非均匀性校正

细节分量图像中场景细节与非均匀性在时域上具有不同的频率特性差异,运动的场景细节在时域中表现为高频特性,而图像的非均匀性则表现为低频.因此,利用这种差异对细节分量图像序列在时域上进行滤波,即可进一步分离其中的场景细节与非均匀性,从而获得良好的校正效果.

2.1 梯度加权均值滤波

由图2(b)可以看出,图像序列中某像素点的时域曲线能够准确地描述该像素点灰度值在一段时间内的变化情况.对于细节分量图像序列中较为平稳的时域曲线,可以认为其所对应的像素点仅包含非均匀性,而



(a) The 100th frame of IR image sequence

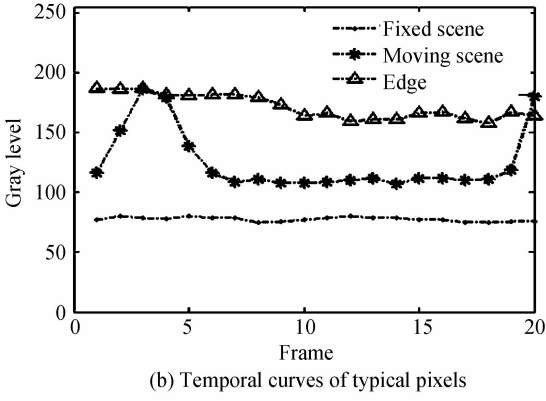


图2 图像序列的时域曲线

Fig. 2 The temporal curves of the IR image sequence

起伏较大的曲线则被认为包含了运动的场景细节信息.因此,可通过时域滤波将起伏较大的高频成分滤除,得到更加准确的非均匀性.

引入时域梯度加权均值滤波来滤除时域曲线上的高频成分.该方法利用时域曲线上每一点的梯度值计算该点的权重,通过计算某一点邻域内各点灰度值的加权平均来得到该点滤波结果.

时域曲线上某点的梯度为

$$g(k) = (x(k) - x(k-1)) + (x(k) - x(k+1)) \quad (6)$$

式中, x 为时域曲线, k 为图像的帧数, 则 k 点的权重 $\omega(k)$ 定义为

$$\omega(k) = e^{-g(k)^2/\varepsilon^2} \quad (7)$$

式中, ε 为调节参量, 根据每一点的权重 $\omega(k)$ 所计算的滤波结果为

$$P_o(k) = \frac{1}{R} \sum_{l=k-w}^{k+w} \omega(l)x(l) \quad (8)$$

$R = \sum_{l=k-w}^{k+w} \omega(l)x(l)$ 为归一化参量, w 为滤波窗口的大小.

2.2 方法步骤

图3给出了基于三边滤波与时域梯度加权均值滤波的非均匀性校正方法流程. 具体步骤为:

1) 分别对 n 帧图像 $x(k), k=1, 2, \dots, n$, 进行三边滤波, 得到图像的基本分量 $x^{TF}(k), k=1, 2, \dots, n$;

2) 将原图像 $x(k)$ 与滤波后的图像 $x^{TF}(k)$ 相减, 得到图像的细节分量 $x'(k)$, 细节分量中包含了非均匀性噪声以及图像场景中的部分边缘细节, 即

$$x'(k) = x(k) - x^{TF}(k) \quad (9)$$

3) 对 n 帧细节分量图像序列 $x'(k), k=1, 2, \dots, n$ 中每一个像素点 (i, j) 做时域曲线 $y(i, j, k), k=1, 2, \dots, n$;

4) 对时域曲线进行梯度加权均值滤波, 得到时域上的低频信号, 即非均匀性

$$P_o(i, j, k) = \frac{1}{R} \sum_{l=k-w}^{k+w} \omega(i, j, l)y(i, j, l) \quad (10)$$

5) 用原图像减去式(10), 得到校正后的图像 $x^{NUC}(n)$ 为

$$x^{NUC}(n) = x(n) - P_o(n) \quad (11)$$

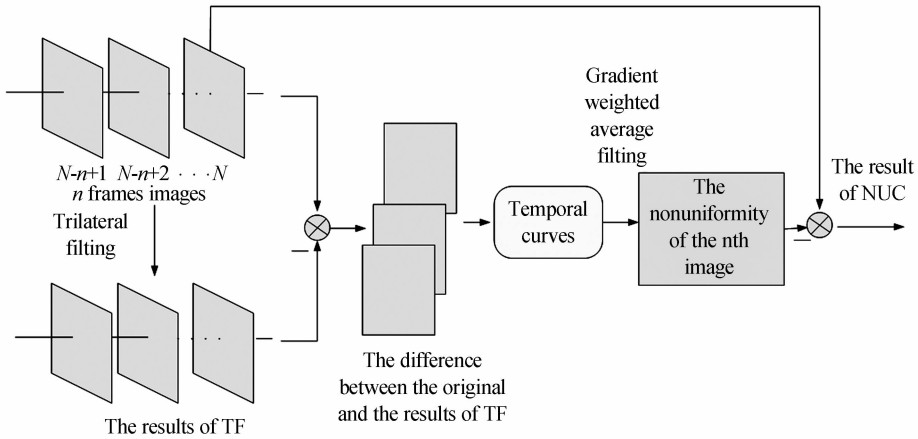


图3 本文方法流程

Fig. 3 Flow chart of proposed NUC method

3 实验结果与对比分析

为了验证本文方法的有效性, 采用两组包含非均匀性的红外图像序列进行实验. 两组红外图像序列均由一台非制冷 256×256 IRFPA 相机以 25 frame/s 的帧频拍摄. 第一组为包含运动弱小目标的天空背景红外图像序列, 第二组为红外图像序列. 为了对比非均匀性校正的效果, 将实验结果与经典的时域高通和神经网络法进行比较, 并采用国标法 U 和粗糙度 ρ 来

定量评价几种方法的校正性能^[14-15].

图4给出了三种方法对人物红外图像序列校正效果的比较. 其中图4(a)为序列中的第100帧图像, 图4(b)~(d)分别为时域高通滤波法、神经网络法以及本文方法的校正结果. 图4(e)~(g)为三种方法原图与校正后的图像的残差图. 在图像序列中, 人物的手臂处于运动状态, 身体部分处于静止状态. 从校正结果可以看出, 时域高通滤波校正后的图像中, 在手臂运动的轨迹上出现了较严重的“鬼影”现象, 并且静止的场景被滤

除,产生了图像退化.神经网络方法得到了较好的校正结果,但从图4(f)可以看出,图像下半部分的非均匀性并未得到有效校正,且图像的边缘出现退化现象.本文方法采用序列中连续的10帧图像进行校正,有效地去除了图像中的非均匀性,得到了良好的校正效果.

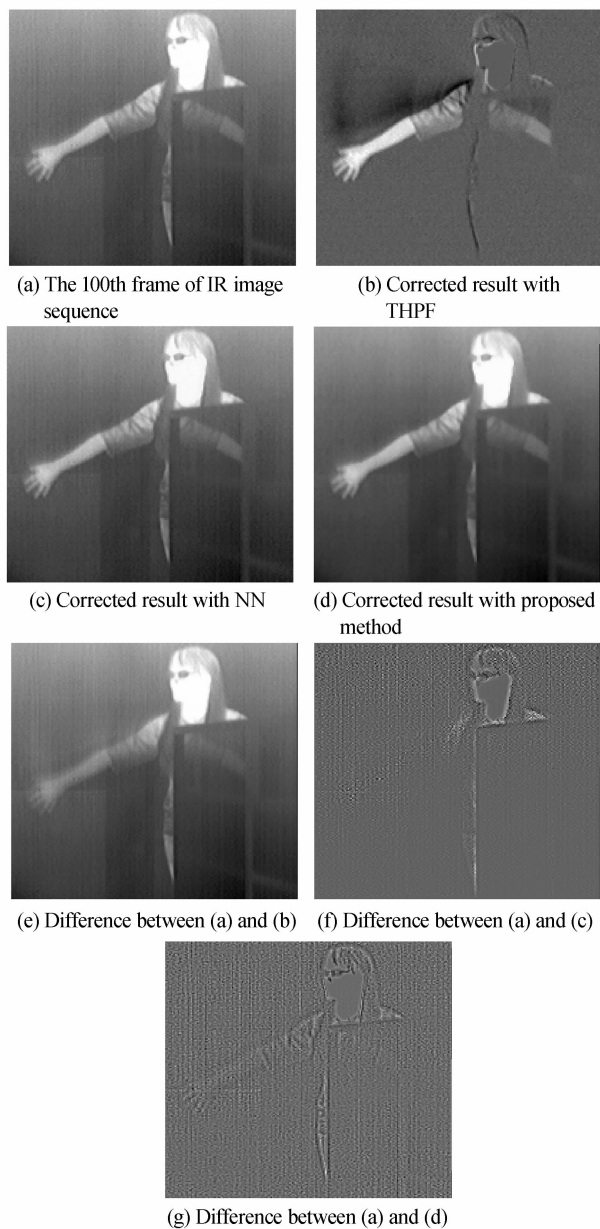


图4 不同方法校正结果

Fig. 4 NUC results of different methods

图5给出了三种方法对包含红外运动弱小目标序列图像的非均匀性校正结果.表1给出几种方法对两组红外图像序列校正结果的非均匀性 U 和粗糙度 ρ , U 和 ρ 越小,表明所评价方法的效果越好.图像序列中的弱小目标运动速度较快,其中的场景相对于目标变化较为缓慢.时域高通滤波方法的校正结果几乎将缓慢变化的场景全部滤除,使图像出现严重退化,表1中的非均匀性指标表明,对于此类图像,时域高通滤波法无法得到满意的结果.神经网络方法取得了一定的校正

效果,但从图5的(c)图可以看出校正结果仍然存在较多的非均匀性,表1中的数据也表明该方法对非均匀性和粗糙度减小的效果并不明显.而本文方法在去除非均匀性的同时更好地保留了弱小目标,图像的非均匀性下降了23.9%,校正效果明显优于其他两种方法.从表1中的数据可以看出,本文方法性能指标较其他方法具有较明显优势.

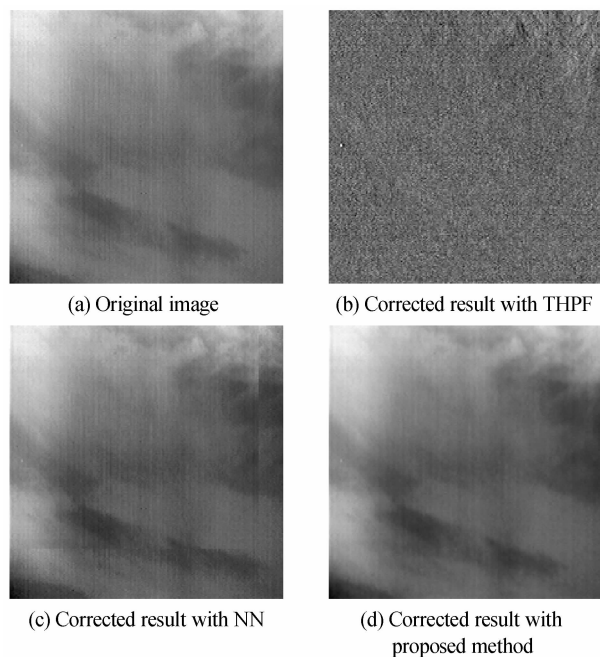


图5 不同方法校正结果

Fig. 5 NUC results of different methods

表1 不同方法校正后结果对比

Table 1 Comparison of different methods

Methods	Figure IR image sequence		Small target IR image sequence	
	$U/\%$	$\rho/\%$	$U/\%$	$\rho/\%$
Original image	4.18	7.17	4.92	8.42
THPF-NUC	1502.4	243	∞	240
NN-NUC	3.88	6.45	4.52	7.23
Proposed method	2.93	3.97	3.74	4.53

同时,由于本文方法的校正效果主要取决于场景变化的快慢,当帧频较高或较低时,只要成像设备所摄场景的变化速度满足要求,本文方法依然适用,也能取得较好的结果.

4 结论

本文通过分析红外图像序列中的非均匀性与运动场景在时域和空域中的不同频率特性,引入了一种结合三边滤波与时域梯度加权均值滤波的红外图像序列非均匀性校正方法.采用两组真实的红外图像序列进行仿真,实验结果表明,仅利用连续的几帧图像便能够得到良好的校正效果,且易于工程应用.但该方法对静止场景的细节处理效果较差,下一步工作将围绕这个

问题做进一步研究.

参考文献

- [1] MILTON A F, BARONE F R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance [J]. *Optical Engineering*, 1985, **24**(5): 855-862.
- [2] TORRES S N, VERA E M, REEVES R A, et al. Adaptive scene-based nonuniformity correction method for infrared-focal plane arrays[C]. AeroSense 2003. International Society for Optics and Photonics, 2003: 130-139.
- [3] LENG Han-bing, ZHOU Zuo-feng, YI Bo, et al. Improved Non-uniformity correction algorithm based on Integration Time Calibration for IRFPA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **43**(1): 110002.
冷寒冰, 周祚峰, 易波, 等. 改进的基于积分时间定标的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. 光子学报, 2013, **43**(1): 110002.
- [4] ZUO C, CHEN Q, GU G, et al. Scene-based non-uniformity correction algorithm based on interframe registration [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, **28**(6): 1164-1176.
- [5] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guo-hua. Non-uniformity correction based on unified photoresponse characteristics of infrared focal plane array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 926-932.
左超, 陈钱, 顾国华. 基于焦平面归一化响应特性的红外非均匀性校正[J]. 光子学报, 2011, **40**(6): 926-932.
- [6] QIAN W, CHEN Q, GU G. Space low-pass and temporal high-pass nonuniformity correction algorithm [J]. *Optical Review*, 2010, **17**(1): 24-29.
- [7] ZHANG Tian-xu, YUAN Ya-jing, SANG Hong-shi, et al. PDE-based deghosting algorithm for correction of non-uniformity in infrared focal plane array [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, **31**(2): 177-182.
张天序, 袁雅婧, 桑红石, 等. 基于 PDE 去鬼影的自适应非均匀性校正算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**(2): 177-182.
- [8] SUI J, DONG L, JIN W, et al. A new adaptive nonuniformity correction algorithm for infrared linescanner based on neural networks[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, **5**(2): 74-76.
- [9] REN J, CHEN Q, QIAN W, et al. Scene-based nonuniformity correction using multiframe registration and iteration method[C]. SPIE Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2014, 91390N.
- [10] ZHAO J, GAO X, CHEN Y, et al. Fast iterative adaptive nonuniformity correction with gradient minimization for infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, **65**: 87-93.
- [11] CHEN Shi-wei, YANG Xiao-gang, ZHANG Sheng-xiu, et al. Research on non-uniformity correction algorithm of IRFPA based on adjusting integral time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 475-479.
陈世伟, 杨小冈, 张胜修, 等. 基于变积分时间的红外焦平面非均匀性校正算法研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(4): 475-479.
- [12] ZHANG Shuang, ZHOU Hui-xin, NIU Xiao-xue, et al. Temporal high-pass filter non-uniformity correction algorithm based non-local means filter for infrared focal plane arrays [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 110003.
张爽, 周慧鑫, 牛肖雪, 等. 基于非局部均值滤波与时域高通滤波的非均匀性校正算法[J]. 光子学报, 2014, **43**(1): 110003.
- [13] CHOUDHURY P, TUMBLIN J. The trilateral filter for high contrast images and meshes[C]. ACM SIGGRAPH 2005 Courses. ACM, 2005: 5.
- [14] BG/T 174442 1998 The technical norms of measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays [S].
- [15] TORRES S N, PEZOA J E, HAYAT M M. Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays by the method of the inverse covariance form [J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(29): 5872-5881.