

doi:10.3788/gzxb20184707.0710002

# 基于相邻像素统计一致性的非均匀性校正方法

刘亚梅

(长春工业大学 机电工程学院, 长春 130012)

**摘 要:** 为了校正长波红外探测器辐射响应非均匀性, 提出了一种基于相邻像素统计一致性的非均匀性校正方法. 首先, 对探测器辐射响应非均匀性建模; 然后, 利用均值算子估计相邻像素之间的比值, 并递推求解校正系数; 最后, 搭建了原理样机对多种不同场景成像. 实验结果表明: 与基于黑体的标定方法相比, 利用本文方法校正后的图像粗糙度由  $1.27 \times 10^{-2}$  降低至  $1.13 \times 10^{-2}$ , 局部标准差峰值由 10.5 降低至 3.5, 可以有效降低红外探测器非均匀性噪声.

**关键词:** 光电探测; 非均匀性校正; 相邻像素统计特性; 红外焦平面阵列; 相对辐射定标

**中图分类号:** TP751.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)07-0710002-9

## Nonuniformity Correction Method Based on Statistical Consistency of Adjacent Pixels

LIU Ya-mei

(Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** To correct the nonuniformity of long-wave infrared detectors, a nonuniformity correction method based on statistical consistency of adjacent pixels is proposed. First, the model of radiance nonuniformity is introduced. Then, the ratio between adjacent pixels is estimated with a mean operator, and the correction coefficients are calculated iteratively. Finally, a principle prototype is set up to grab different scenes. Experimental results demonstrate that the proposed method can decrease the roughness of the corrected images from  $1.27 \times 10^{-2}$  to  $1.13 \times 10^{-2}$ , and the local standard deviation from 10.5 to 3.5, compared with the calibration-based method. The proposed method can reduce nonuniformity noise of infrared detectors effectively.

**Key words:** Photoelectric detection; Non-uniformity correction; Statistics of adjacent pixels; Infrared focal plane array; Relative radiometric calibration

**OCIS Codes:** 100.2550; 040.2480; 110.3080; 010.5630

## 0 引言

长波红外探测器常应用于红外搜索与跟踪系统(Infrared Search and Track,IRST)和红外导引头系统中.与雷达系统相比,IRST系统具有无源、不受电磁干扰和测向精度高等优点,是雷达预警系统的有效补充.但由于读出电路和每个像元的辐射响应的差异,红外探测器常受严重的非均匀性噪声干扰.非均匀性噪声是红外探测器的主要噪声来源,会降低IRST系统的探测概率,增大虚警率,缩短探测距离,是制约IRST系统极限探测的瓶颈<sup>[1-3]</sup>.因此,有必要研究高精度的非均匀校正算法.

目前,非均匀性校正方法主要分为基于黑体标定的方法和基于场景的方法两类.基于黑体标定的方法需要在实验室计算并存储校正系数矩阵,但由于探测器的辐射响应会随时间缓慢漂移,校正精度下降<sup>[1]</sup>.工程

**基金项目:** 吉林省科技厅自然科学基金(No.20160101340JC)资助

**第一作者:** 刘亚梅(1970—),女,副教授,硕士,主要研究方向为光机电系统.Email:liuyamei1970@126.com

**收稿日期:** 2018-03-13; **录用日期:** 2018-05-15

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

中常用的方法是在光路中嵌入可控温黑体,进行在线标定<sup>[2]</sup>.这种方法除了增加载荷重量、体积和成本之外,需要中断正常的成像过程.此外,对于大口径的光学系统,受载荷体积的限制,无法利用可控温黑体对光学系统的主镜进行标定,即无法对整套光学系统标定.受探测器辐射响应非线性影响,工程中常用的两点校正法存在非线性误差.多点校正法能够在一定程度抑制非线性误差,但也不能完全解决辐射响应非线性问题.

基于场景的校正方法包括恒定统计法、基于配准的方法和最小均方差法等.恒定统计法通过调整校正系数,使所有像元在时间域内的均值和标准差分别相等<sup>[3-6]</sup>.这类方法收敛速度慢,容易产生鬼影现象.此外,对于以天空为背景的图像,由于场景温度随海拔升高而降低,每个像素不再满足在时间域内均值相等的假设.基于配准的方法校正精度高,但当视场中存在非刚体目标,如云等,配准精度不高,鲁棒性差,校正精度下降<sup>[7]</sup>.最小均方差法的校正误差主要源自对真实场景的估计误差,也存在鬼影和收敛速度慢的问题<sup>[8]</sup>.

为了校正探测器辐射响应非均匀性,本文提出了一种基于相邻像素统计一致性的非均匀性校正方法.构建了非均匀性校正问题的数学模型,在时间域和空间域统计假设的基础上设计了校正方法,并给出了详细的理论推导.

## 1 非均匀性校正算法

### 1.1 校正模型

工程上,常利用线性模型对红外探测器的噪声建模,即

$$J_{i,j}(f) = k_{i,j}I_{i,j}(f) + b_{i,j} + n_{i,j}(f) \quad (1)$$

式中, $i \in [1, M]$ 是行索引, $j \in [1, N]$ 是列索引,坐标原点在图像的左上角, $M$ 和 $N$ 分别是竖直和水平方向像元数量; $f$ 是帧索引, $I_{i,j}(f)$ 是第 $f$ 帧原始图像, $J_{i,j}(f)$ 是第 $f$ 帧校正后图像; $b_{i,j}$ 是偏置值,主要源自辐射响应随温度漂移<sup>[9]</sup>; $n_{i,j}(f)$ 是时域高斯随机噪声.

非均匀性噪声是空间域噪声,在求解校正系数过程中可以忽略时域随机噪声 $n_{i,j}(f)$ .考虑到可以通过重复计算校正系数的方法解决温度漂移 $b_{i,j}$ 的问题,因此可以将校正模型退化为

$$J_{i,j}(f) = k_{i,j}I_{i,j}(f) \quad (2)$$

至此,非均匀性校正问题转化为根据多帧原始图像估计校正系数 $k_{i,j}$ .

### 1.2 基于相邻像素统计一致性的校正方法

当全局统计一致性的假设不能被满足时,校正后图像会出现鬼影现象.本文方法将该假设条件一般化,即从全局的统计一致性收敛到局部的相邻像素的统计一致性.

不考虑左边界和上边界的像素,对于 $i \in [2, M]$ 且 $j \in [2, N]$ ,根据相邻像素统计一致性,有

$$T_F \left[ \frac{J_{i,j}(f)}{\sqrt{J_{i-1,j}(f)J_{i,j-1}(f)}} \right] = 1 \quad (3)$$

式中, $T_F[\cdot]$ 代表求 $F$ 帧像素的统计量,包括但不限于中值和均值算子等.将式(2)带入式(3),有

$$T_F \left[ \frac{k_{i,j}}{\sqrt{k_{i-1,j}k_{i,j-1}}} \cdot \frac{I_{i,j}(f)}{\sqrt{I_{i-1,j}(f)I_{i,j-1}(f)}} \right] = 1 \quad (4)$$

式中, $\frac{k_{i,j}}{\sqrt{k_{i-1,j}k_{i,j-1}}}$ 是常量,与帧索引 $f$ 无关.因此,该项可以从算子 $T_F[\cdot]$ 中提出.式(4)可以进一步化简为

$$\frac{k_{i,j}}{\sqrt{k_{i-1,j}k_{i,j-1}}} \cdot T_F \left[ \frac{I_{i,j}(f)}{\sqrt{I_{i-1,j}(f)I_{i,j-1}(f)}} \right] = 1 \quad (5)$$

为了表示方便,设 $I_{i,j}(f)$ 与相邻两个像素几何平均数的比值为 $R_{i,j}(f)$ ,即

$$R_{i,j}(f) = \frac{I_{i,j}(f)}{\sqrt{I_{i-1,j}(f)I_{i,j-1}(f)}} \quad (6)$$

式(5)可以改写为

$$k_{i,j} = \frac{\sqrt{k_{i-1,j}k_{i,j-1}}}{T_F[R_{i,j}(f)]} \quad (7)$$

式中, $T_F[R_{i,j}(f)]$ 可以根据原始图像直接计算.从式(7)可以看出,为了求解校正系数 $k_{i,j}$ ,需要先求解校正

系数  $k_{i-1,j}$  和  $k_{i,j-1}$ ; 为了求解校正系数  $k_{i,j}$ , 需要先求解校正系数  $k_{i-2,j}$  和  $k_{i-1,j-1}$ ; 为了求解校正系数  $k_{i-2,j}$ , 需要先求解校正系数  $k_{i-3,j}$  和  $k_{i-2,j-1}$ . 依此递推, 求解校正系数  $k_{i,j}$  转化为首先求解左边界校正系数和上边界校正系数.

对于上边界的像素, 即  $i=1$  的第一行像素, 与式(7)同理, 根据相邻像素统计一致性, 有

$$\frac{k_{1,j}}{k_{1,j-1}} \cdot T_F \left[ \frac{I_{1,j}(f)}{I_{1,j-1}(f)} \right] = 1 \quad (8)$$

令

$$R_{1,j}(f) = \frac{I_{1,j}(f)}{I_{1,j-1}(f)} \quad (9)$$

则

$$k_{1,j} = \frac{k_{1,j-1}}{T_F [R_{1,j}(f)]} \quad (10)$$

对于  $j=1$  的第一列像素, 令

$$R_{i,1}(f) = \frac{I_{i,1}(f)}{I_{i-1,1}(f)} \quad (11)$$

与式(10)同理, 有

$$k_{i,1} = \frac{k_{i-1,1}}{T_F [R_{i,1}(f)]} \quad (12)$$

如图 1, 算法的流程可以总结为: 1) 初始化帧数量  $F$ , 其典型值为 1 000; 2) 循环计算每一个像素与相邻像素的比值, 并计算比值的统计量  $T_F [R_{i,j}(f)]$ ; 3) 递推计算校正系数  $k_{i,j}$ .

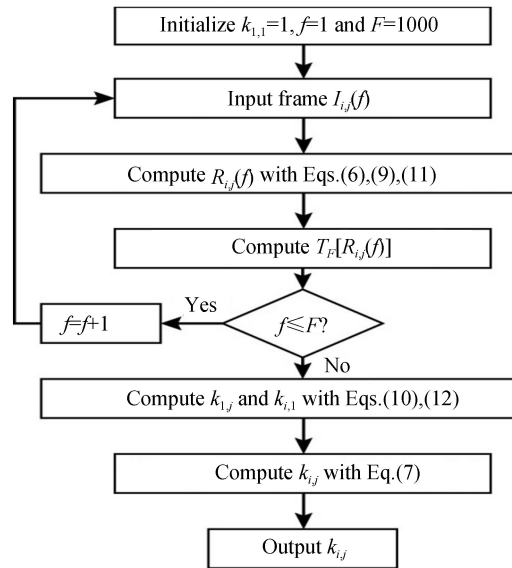


图 1 本文算法流程

Fig.1 Flow of the proposed method

## 2 实验结果

利用 Sofradir 公司生产的制冷型长波红外探测器搭建了原理样机, 进行实验室低温黑体标定实验和外场成像实验. 低温黑体标定平台如图 2 所示.

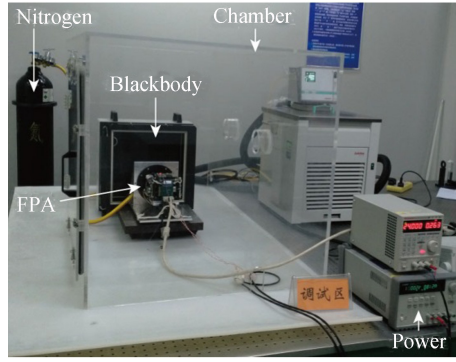


图2 低温黑体标定平台

Fig.2 Calibration platform with a low-temperature blackbody

标定实验中,将原理样机充分靠近低温黑体.采用两个措施提高实验精度:1)将原理样机和黑体放置于有机玻璃密室内,并持续通入干燥氮气,防止低温黑体遇水蒸气结霜;2)将整套实验装置放置于光学隔振平台上,减少微弱扰动等带来的误差.实验中所用的红外光学系统参数见表1.

表1 红外光学成像系统参数

Table 1 Parameters of the infrared optical imaging system

Parameters	Value
Spectral band pass/ $\mu\text{m}$	7.7~11.3
Digital resolution	320×256
Noise equivalent temperature difference/mK	17.32
Analog-to-digital converter resolution/bit	14
Operating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	-196
Frame rate/(f · s <sup>-1</sup> )	50
Focal length/mm	38
F/#	2
Integration time/ $\mu\text{s}$	300

为了充分证明本文方法的有效性,对地面和天空等多种复杂场景成像,将本文方法与基于低温黑体的标定方法(Blackbody-Based Non-Uniformity Correction, BBNUC)<sup>[1]</sup>和差分统计方法(Adjacent Differential Statistics, ADS)<sup>[5]</sup>作对比,采用主观定性和客观定量指标评价校正效果.定性指标指利用人眼评价校正后图像视觉效果,定量指标包括3×3邻域局部标准差(Standard Deviation, STD)统计量和图像粗糙度.校正后图像 $J$ 的粗糙度 $\rho(J)$ 定义为

$$\rho(J) = \frac{\|d_h \otimes J\|_1 + \|d_v \otimes J\|_1}{\|J\|_1} \quad (13)$$

式中, $d_h = [1, -1]$ 代表水平方向差分算子, $d_v = [1, -1]^T$ 代表竖直方向差分算子,“ $\otimes$ ”是卷积运算符.粗糙度越低,代表图像越平滑,校正效果越好.

### 2.1 以地面为背景的场景

将原理样机固定在 FLIR 公司生产的转台上,保持俯仰角固定不变,从 35 m 高的楼顶俯拍地面场景.地面场景包含建筑、道路、汽车和草地等.通过以太网接口控制转台以 5.0°/s 的速度匀速转动,同时利用采集卡采集图像,并通过 CameraLink 接口将原始图像传输至上位机保存.不失一般性,第 50 帧原始图像如图 3(a)所示.为了方便显示,将 14 位的原始图像线性拉伸.

在 BBNUC 方法中,分别设置黑体温度为 30.00 $^{\circ}\text{C}$  和 10.00 $^{\circ}\text{C}$ ,并利用采集到的黑体图像计算校正系数.这样选取温度点的目的是尽量接近场景的真实温度,减少非线性误差<sup>[10-12]</sup>.利用 BBNUC 方法校正后的图像如图 3(b)所示.连续采集 1000 帧原始图像,利用 ADS 方法和本文方法校正后的图像如图 3(c)和 3(d)所示.其中,本文方法中  $T_F[\cdot]$ 算子采用均值运算.

从图 3 中可以看出,原始图像中存在大量的非均匀性噪声,图像质量差.利用 ADS 方法和本文方法校正后图像效果优于基于标定的方法.利用本文方法计算得到的校正系数如图 4 所示.可以看出,校正系数在 1 附

近波动.

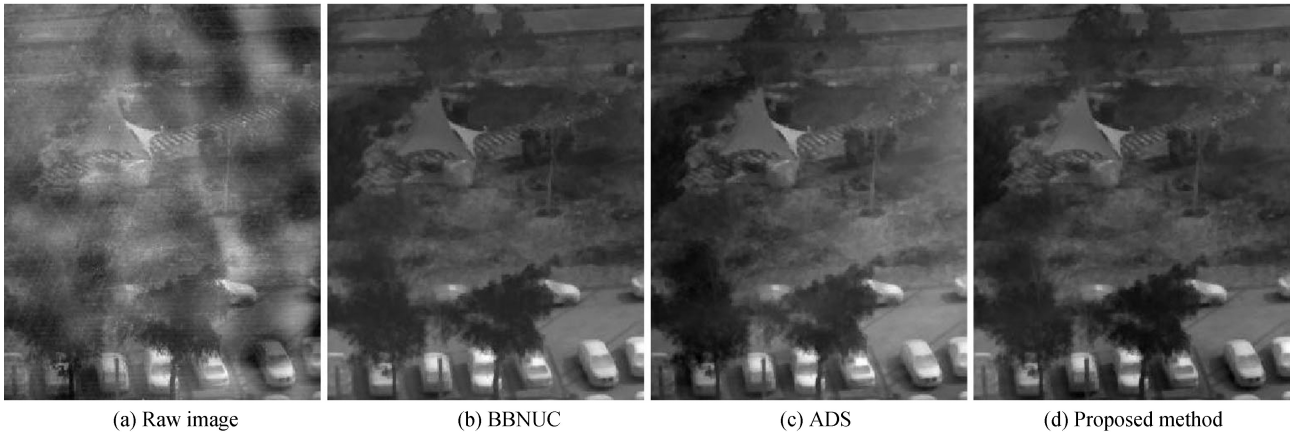


图3 利用不同方法校正的对地场景图像

Fig.3 Images of the ground scenes corrected by different methods

为了定量评价本文算法对地面场景的有效性,逐帧计算了前50帧校正后图像的粗糙度 $\rho$ 随帧索引 $f$ 变化曲线,如图5.

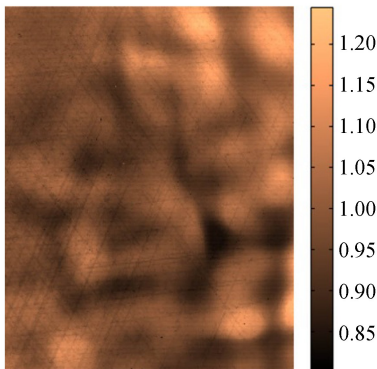


图4 利用本文方法求得的校正系数

Fig.4 Correction coefficients with the proposed method

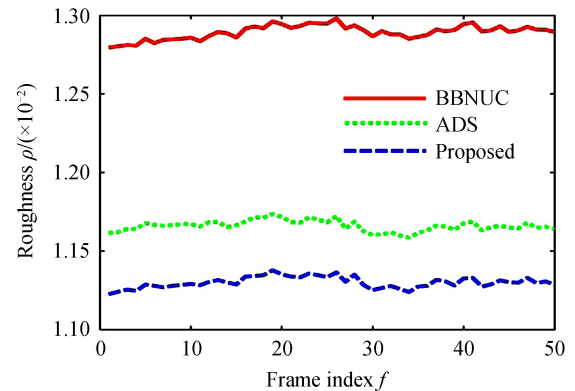


图5 不同方法校正后图像的粗糙度

Fig.5 Roughness of the corrected images with different methods

从图5可以看出,相比BBNUC方法和ADS方法,本文方法可以将粗糙度 $\rho$ 分别降低 $0.2 \times 10^{-2}$ 和 $0.05 \times 10^{-2}$ 左右,验证了本文方法校正地物场景的有效性.

## 2.2 以天空为背景的场景

在2.1节的基础上,增大相机的俯仰角,使视场中充满天空背景,匀速改变相机的方位角,采集到的第50帧原始图像和利用对比方法校正后图像如图6所示.在BBNUC方法中,分别设置黑体温度为 $-10.00^\circ\text{C}$ 和 $-20.00^\circ\text{C}$ .该实验能够有效模拟对空探测相关的应用.

从图6中可以看到,视场中含有少量的云.利用BBNUC方法校正后图像无鬼影,但从视觉效果上看,图像存在严重噪声,噪声主要源自利用线性模型近似非线性模型的近似误差.由于场景的温度范围大,对于远离两个参考温度点的像素点,校正误差逐渐增大.ADS方法校正后图像存在少量鬼影,尤其是在没有云的平坦区域.但从视觉效果上看,ADS方法仍优于两点校正法.相比而言,利用本文方法校正后的图像视觉效果最佳,校正后图像平滑、均匀.此外,对比图6(b)和(d)可以看出,利用本文方法校正后的图像与标定法校正后的图像存在较大对比度的差异,产生该现象的原因是本文方法本质上属于相对辐射定标,不适用于需要绝对定标的应用.

在IRST系统中,更低的局部标准差意味着更高的信噪比.而信噪比高对应探测距离远、探测概率高和虚警率低<sup>[13]</sup>.因此,为了定量评价校正后图像的效果,分别统计各种方法校正后图像 $3 \times 3$ 邻域局部标准差概率密度函数和累计分布函数,如图7.从图7(a)可以看出,与BBNUC方法相比,本文方法可以将局部标准差

峰值从 10.5 降低至 3.5,证明了在以天空为背景的IRST系统中的有效性.

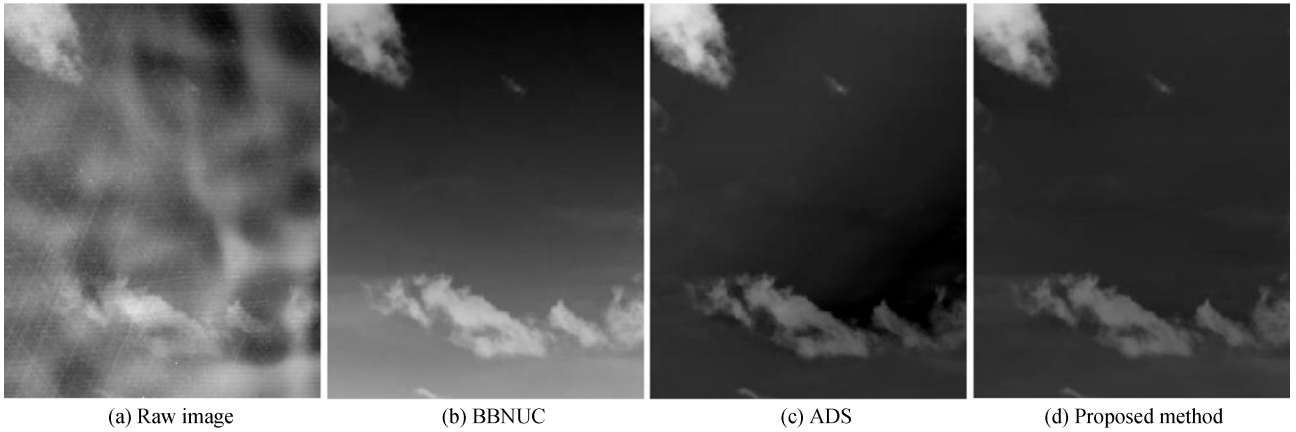


图 6 利用不同方法校正的对空场景图像  
Fig.6 Images of the sky scenes corrected by different methods

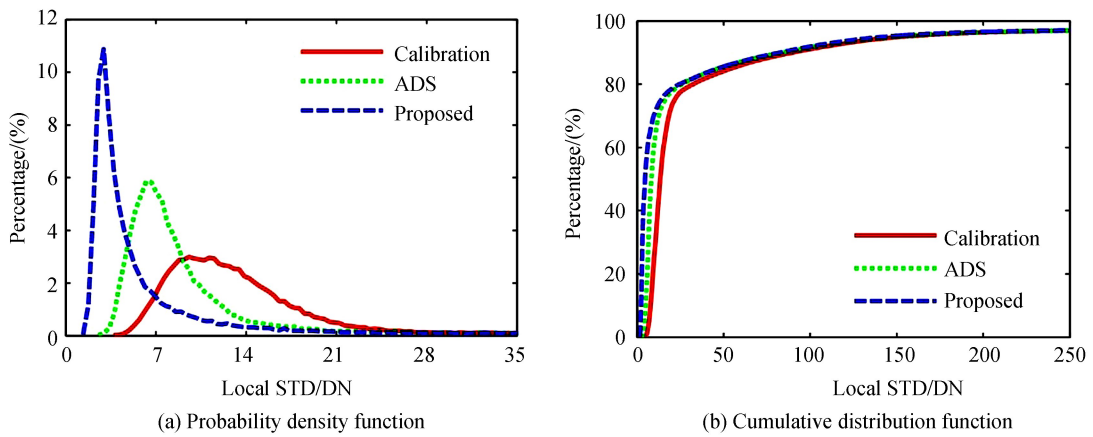


图 7 校正后图像局部标准差对比  
Fig.7 Comparison of the local STD of the corrected images

### 2.3 以天空和地面为背景的场景

为了进一步验证本文方法对不同场景的有效性和鲁棒性,对“半天半地”场景成像,即视场中同时包含天空、树木和楼房等信息.不失一般性,以第 50 帧和第 100 帧图像为例,利用本文方法和对比方法校正后的图像如图 8 和 9 所示.

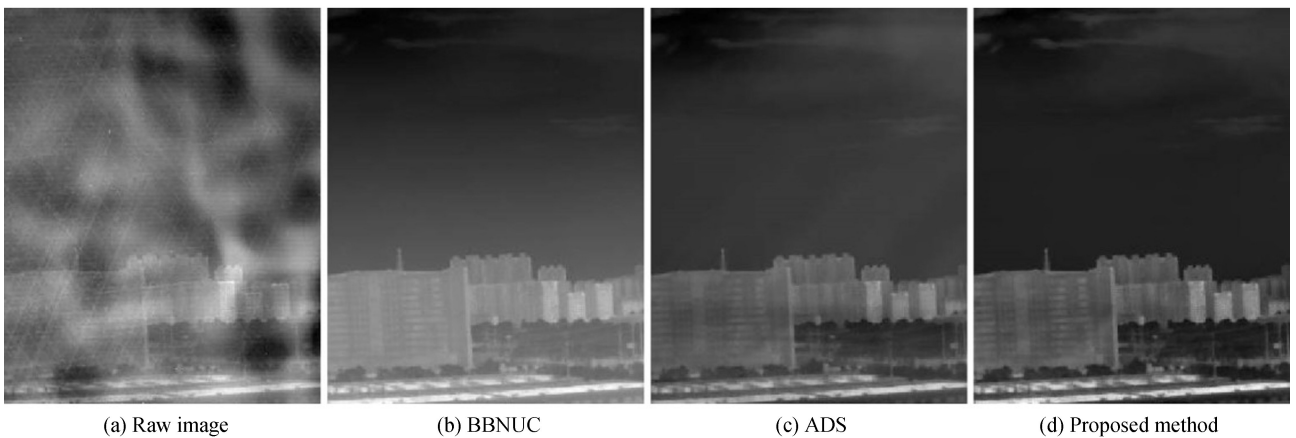


图 8 利用不同方法校正的对空及对地场景第 50 帧图像  
Fig.8 The 50th frame of the sky and the ground scenes corrected by different methods

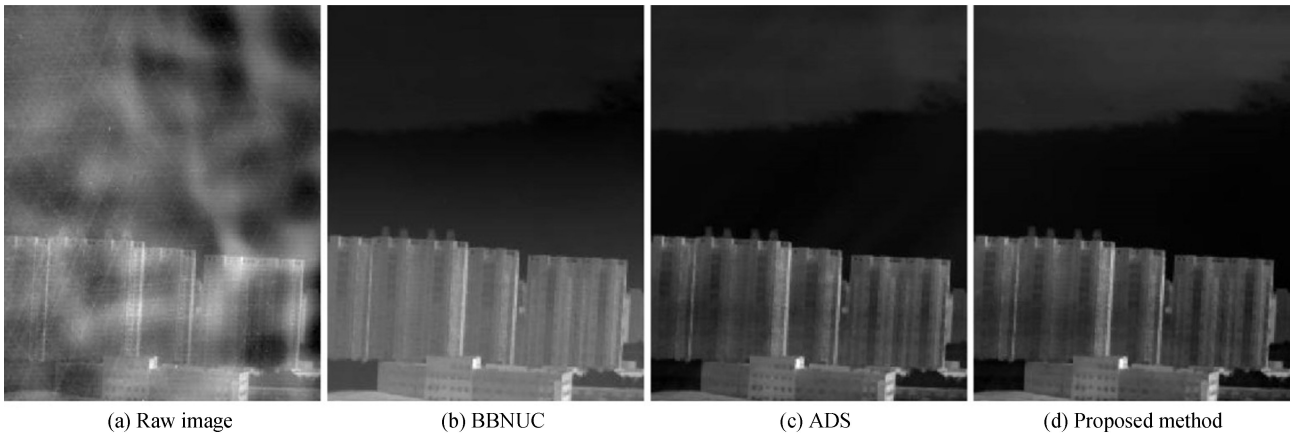


图 9 利用不同方法校正的对空及对地场景第 100 帧图像  
Fig.9 The 100th frame of the sky and the ground scenes corrected by different methods

从图 8 中可以看出,利用 ADS 方法校正后的图像无鬼影,图像边缘锐利,可以清晰地分辨远处楼房的窗户等细节信息.在图 9 中,可以清晰地看到利用本文方法校正后图像中云层的边缘,明显优于标定法和 ADS 方法.因此,与标定法和 ADS 方法相比,利用本文方法校正后的图像视觉效果最好.

除了主观视觉质量之外,利用图像粗糙度定量评价不同方法的校正效果,结果如表 2 所示.从表中可以看出,与主观视觉质量一致,本文方法非均匀性校正效果最佳,证明了其对一般场景的有效性和鲁棒性.

表 2 不同方法校正后图像的粗糙度( $\times 10^{-2}$ )  
Table 2 Roughness of the corrected images with different methods( $\times 10^{-2}$ )

	BBNUC	ADS	Proposed
Frame 50	1.24	1.10	1.05
Frame 100	1.19	1.06	1.03

### 3 讨论

本文方法可以在嵌入式平台实现<sup>[14-15]</sup>.搭建了嵌入式平台,其硬件结构示意图如图 10 所示.该平台由 DSP 模块和 FPGA 模块组成.其中,DSP 模块以 TI 公司生产的 TMS320C6455 为主芯片,主要用于实现非均匀性校正算法;FPGA 模块以 Altera 公司生产的 EP3C40F484C8 为主芯片,主要用于输入信号和时序控制;DSP 模块和 FPGA 模块通过低引脚数目接口(Low Pin Count , LPC)相连.此外,DSP 模块板载 256 MB 的 DDR2-500 存储空间,可以用来存储数据.该硬件的工作流程为:将红外相机通过 CameraLink 接口连接至 FPGA 模块;再利用 FPGA 采集原始数据,并通过 LPC 接口传输至 DSP;DSP 处理后将结果通过以太网接口传输至上位机显示.

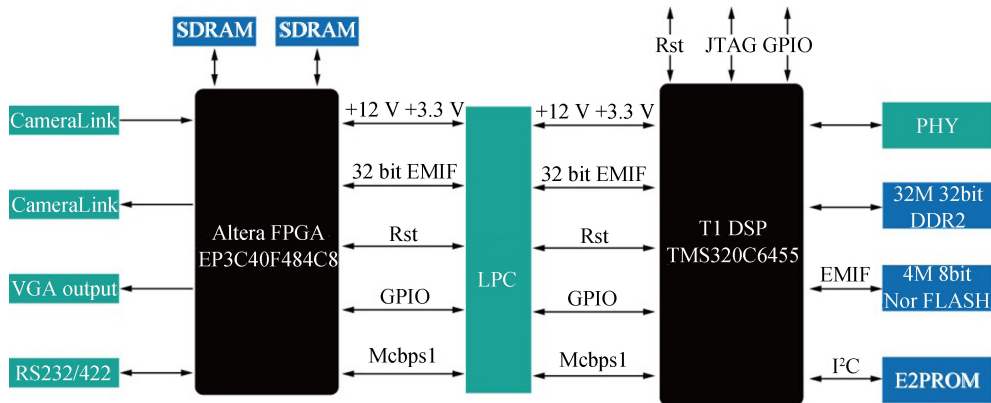


图 10 利用 FPGA 和 DSP 搭建的硬件平台  
Fig.10 Hardware platform built with FPGA and DSP

对于帧频为 50 f/s 的红外相机,本文校正算法在该平台的运行时间为 21.05 s,其中包括采集 1000 帧图

像需要的时间.校正系数不需要逐帧更新,每隔指定的时间间隔更新一次即可.具体的时间间隔依探测器特性而定.校正过程仅涉及乘法运算,满足实时性要求.

$T_F[\cdot]$ 算子可以是均值算子或中值算子.均值算子的优点是可以迭代实现,不需要额外的存储空间<sup>[3]</sup>,缺点是抗鬼影能力弱,需要帧数  $F$  取较大值才能收敛, $F$  的典型值为 1 000.中值算子的优点是抗鬼影能力强,收敛速度快,缺点是需要较大的存储空间存储  $F$  帧原始图像.但随着半导体技术的发展,存储空间不再是硬件实现的瓶颈.从本质上讲,当  $F$  足够大时,均值算子和中值算子性能一致.

需要明确指出本文方法的适用范围:1)本文方法在校正过程中未使用低温黑体,属于相对辐射定标方法,不能够保证绝对辐射精度;2)与其他基于场景的校正方法一致,利用本文方法计算校正系数过程中,需要场景和相机的之间存在相对运动.针对问题 1),可以采用标定法和本文方法相结合的方法:首先,在实验室利用低温黑体和两点校正法进行第一次校正,保证绝对辐射精度;其次,在外场应用中,再利用本文方法进行第二次校正,可以有效解决辐射响应随时间漂移的问题.针对问题 2),多数的应用均能满足场景和相机的之间存在相对运动的条件.

## 4 结论

针对长波红外探测器辐射响应非均匀性的问题,提出一种基于相邻像素统计一致性的非均匀性校正方法,利用均值算子估计当前像素与相邻两个像素几何平均数的比值,再迭代计算校正系数.外场实验结果表明:与基于黑体的标定方法相比,本文方法可以将以地物为背景的图像粗糙度由  $1.27 \times 10^{-2}$  降低到  $1.13 \times 10^{-2}$ ,将以天空为背景的图像局部标准差峰值由 10.5 降低到 3.5.本文方法原理简单、鲁棒性强,可以在嵌入式平台实现,能够校正整套光学系统的非均匀性.

### 参考文献

- [1] PERRY D L, DERENIAK E L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors [J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(8): 1854-1859.
- [2] LIANG Kun, YANG Cai-lan, LI Peng, *et al.* Nonuniformity correction based on focal plane array temperature in uncooled long-wave infrared cameras without a shutter[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(4): 884.
- [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): 772-780.
- [4] MENG Si-qi, REN Kan, LU Dong-ming, *et al.* A non-uniformity correction algorithm of infrared image sequences based on constant-statistics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, **38**(2): 304-308.  
孟思岐, 任侃, 路东明, 等. 一种基于恒定统计的红外图像非均匀性校正算法[J]. *应用光学*, 2017, **38**(2): 304-308.
- [5] GENG Li-xiang, CHEN Qian, QIAN Wei-xian. An adjacent differential statistics method for IRFPA nonuniformity correction[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, **5**(6): 6801615.
- [6] LI Jia, QIN Han-lin, YAN Xiang, *et al.* Temporal-spatial nonlinear filter based non-uniformity correction method for IR image sequence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0410001.  
李佳, 秦翰林, 延翔, 等. 时空域非线性滤波红外序列图像非均匀性校正[J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 0410001.
- [7] ZENG Jun-jie, SUI Xiu-bao, GAO Hang. Adaptive image-registration-based nonuniformity correction algorithm with ghost artifacts eliminating for infrared focal plane arrays[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(5): 1-16.
- [8] PAN Ke-chen, GU Guo-hua, CHEN Qian, *et al.* An improved total variation model for correcting the stripe nonuniformity in IRFPA image[J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(2): 138-143.  
潘科辰, 顾国华, 陈钱, 等. 一种改进的全变分模型校正红外焦平面阵列条纹非均匀性[J]. *红外技术*, 2016, **38**(2): 138-143.
- [9] LI Zhou, YU Yi, TIAN Qi-jie, *et al.* High-efficiency non-uniformity correction for wide dynamic linear infrared radiometry system[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**: 395-402.
- [10] HUO Li-jun, ZHOU Da-biao, WANG De-jiang, *et al.* Staircase-scene-based nonuniformity correction in aerial point target detection systems[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(25): 7149-7156.
- [11] YU Yi, CHANG Song-tao, WANG Hao, *et al.* Fast non-uniformity correction for high dynamic infrared radiometric system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 1932-1938.  
余毅, 常松涛, 王昊, 等. 宽动态范围红外测量系统的快速非均匀性校正[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(7): 1932-1938.
- [12] ZHENG Liang-liang, JIN Guang, QU Hong-song, *et al.* Non-uniformity correction for multi-channel TDI CCD imaging system in wide response range[J]. *Acta Optical Sinica*, 2017, **37**(11): 1111001.  
郑亮亮, 金光, 曲宏松, 等. 多通道宽响应域 TDI CCD 成像系统的非均匀性校正[J]. *光学学报*, 2017, **37**(11): 1111001.



- [13] YI Xiang, WANG Bing-jian. Fast infrared and dim darget detection algorithm based on multi-feature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(6): 0610002.  
易翔, 王炳健. 基于多特征的快速红外弱小目标检测算法[J]. 光子学报, 2017, **46**(6): 0610002.
- [14] WANG Ming-chang, FAN Yang-yu, CHEN Bao-guo, *et al.* Realization of adaptive non-uniformity correction of infrared image based on SOPC[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **46**(6): 0628001.  
王明昌, 樊养余, 陈宝国, 等. 基于 SOPC 的红外图像自适应非均匀性校正设计[J]. 红外与激光工程, 2015, **46**(6): 0628001.
- [15] RONG Sheng-hui, ZHOU Hui-xin, WEN Zhi-gang, *et al.* An improved non-uniformity correction algorithm and its hardware implementation on FPGA[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**: 410-420.

---

**Foundation item:** Natural Science Foundation of Jilin Provincial Science and Technology Agency (No. 20160101340JC)

引用格式: LIU Ya-mei. Nonuniformity Correction Method Based on Statistical Consistency of Adjacent Pixels[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0710002

刘亚梅. 基于相邻像素统计一致性的非均匀性校正方法[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0710002