

文章编号: 1001 - 9014(2010)01 - 0023 - 04

# 一种红外焦平面非均匀性组合校正算法

施长城, 张天序\*, 刘慧娜, 李洁珺, 周 泐, 袁雅婧

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所 多谱信息处理技术国家级重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**分析了传统神经网络非均匀性校正算法在空域处理过程中产生目标退化的原因,在总结基于边缘指导的神经网络校正算法(ED-NN-NUC)与一点定标和神经网络结合的校正算法的基础上,提出了新的组合校正算法.新算法包含预校正、粗校正和精校正三个处理模块,利用含有弱小目标的实际红外图像进行了实验验证.结果表明,新算法能有效地抑止目标退化,并在运算速度上比 ED-NN-NUC 有一定的提高.

**关键词:**自适应校正算法;自适应步长;神经网络;目标退化

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A

## COMBINATIONAL ALGORITHM FOR NONUNIFORMITY CORRECTION OF INFRARED FOCAL PLANE ARRAY

SHI Chang-Cheng, ZHANG Tian-Xu\*, LU Hui-Na, LI Jie-Jun, ZHOU Yang, YUAN Ya-Jing

(National Laboratory for Multi-spectral Information Processing Technology, Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The cause of the target fade-out in the traditional neural network nonuniformity correction algorithms for infrared focal plane array (RFPA) was studied. A new combinational algorithm for nonuniformity correction was proposed on the basis of analyzing the strengths and limitations of edge-directed NN scheme (ED-NN-NUC) and nonuniformity correction combining one-point calibration and NN-NUC. The new algorithm includes three modules which are pre-correction, rough correction and accurate correction. The real infrared image including dim targets was used to validate the proposed algorithm. The results show that the proposed algorithm can effectively eliminate the target fade-out, and it is less time consuming than ED-NN-NUC.

**Key words:** adaptive correction algorithm; adaptive step; neural network; target fade-out

## 引言

红外成像系统随着红外探测器的发展而发展.在第一代红外成像系统中,采用线列探测器,通过一维光机扫描实现成像.随着 CCD 相关技术的成熟,到了 20 世纪 70 年代中期,红外焦平面阵列探测器 (RFPA, Infrared Focal Plane Array) 的出现标志着第二代红外成像系统——凝视红外成像系统的诞生.与线列探测器相比,焦平面探测器成像具有空间分辨率高、探测能力强、帧频高等优点.然而,红外焦平面阵列存在的非均匀性严重影响了系统的成像质量,降低了系统的空间分辨率、温度分辨率、探测距离以及辐射量的正确度量,直接制约着系统的最终性能.针对这些问题,人们提出相应的校正方法,主

要分为两大类.一类是基于定标的校正方法,该类方法原理简洁,硬件易于实现和集成;校正精度高,可用于场景温度的度量;对目标没有任何要求.但这类方法实际校正时需要参考源进行标定,使得设备装置相对复杂;对于机载、弹载探测器不易做到快速反应.另一类是基于场景类的自适应校正方法<sup>[1~6]</sup>,如神经网络校正法 (NN-NUC).这类方法可以在一定程度上克服 RFPA 响应漂移带来的校正误差,不要求或只需要简单的定标,根据场景信息适应性地更新校正系数,成为目前算法研究和系统应用的重要研究方向.

本文主要针对神经网络校正算法中目标退化的问题展开了研究,在总结基于边缘指导的神经网络校正算法<sup>[7]</sup> (ED-NN-NUC) 和一点定标与神经网络

收稿日期: 2009 - 02 - 21, 修回日期: 2009 - 12 - 07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助 (60736010, 10577009)

作者简介: 施长城 (1981-), 男, 重庆人, 硕士, 主要研究方向为图像分析与智能系统、红外成像特性分析和非均匀校正自适应算法等.

\*通讯作者: txzhang@mail.hust.edu.cn

Received date: 2009 - 02 - 21, revised date: 2009 - 12 - 07

结合的校正算法<sup>[8]</sup>的基础上,提出了新的组合校正算法.针对含有弱小目标的实际红外图像进行了实验,结果表明,新算法能有效地抑制目标退化,并在运算速度上比 ED-NN-NUC有一定的提高.

## 1 神经网络算法存在问题分析

Scribner所提出的 NN-NUC方法模拟人视网膜中低层处理的机制,假设 RFPA 某单元邻域的平均响应作为该单元的理想输出,并将该值反馈到校正系数调整环节,由调整环节通过最陡下降法来不断更新增益和偏移校正系数,然后由 NUC 神经元实现对 RFPA 各单元的自适应校正.主要过程如下.

假设  $x$  是存在非均匀性噪声的图像,经过 NUC 校正单元处理后输出为  $y$ ,对于像元  $(i, j)$  两者关系为:

$$y_{ij}^n = a_{ij}^n \cdot x_{ij}^n + b_{ij}^n, \quad (1)$$

其中,  $n$  表示第  $n$  帧图像,  $a_{ij}^n$  和  $b_{ij}^n$  分别为像元  $(i, j)$  的增益和偏移校正系数.像元  $(i, j)$  期望的校正输出  $f_{ij}^n$  采用像元  $(i, j)$  其 4 邻域  $y^n$  的空间均值,由网络中的隐含层计算得到:

$$f_{ij}^n = (y_{i-1,j}^n + y_{i+1,j}^n + y_{i,j-1}^n + y_{i,j+1}^n) / 4, \quad (2)$$

误差函数为

$$e_{ij}^n = [y_{ij}^n - f_{ij}^n]^2 = [a_{ij}^n \cdot x_{ij}^n + b_{ij}^n - f_{ij}^n]^2, \quad (3)$$

对其求关于  $a_{ij}^n$  和  $b_{ij}^n$  的偏导数

$$\begin{aligned} \frac{\partial e_{ij}^n}{\partial a_{ij}^n} &= 2x_{ij}^n (y_{ij}^n - f_{ij}^n) \\ \frac{\partial e_{ij}^n}{\partial b_{ij}^n} &= 2(y_{ij}^n - f_{ij}^n) \end{aligned}, \quad (4)$$

则利用最陡下降法,沿误差性能曲面最陡方向向下搜索曲面的最低点.由此得到  $a_{ij}^{n+1}$  和  $b_{ij}^{n+1}$ ,其中迭代步长为  $\mu$ :

$$\begin{cases} a_{ij}^{n+1} = a_{ij}^n - 2\mu \cdot x_{ij}^n (y_{ij}^n - f_{ij}^n) \\ b_{ij}^{n+1} = b_{ij}^n - 2\mu \cdot (y_{ij}^n - f_{ij}^n) \end{cases}. \quad (5)$$

在得到像元  $(i, j)$  期望校正输出  $f_{ij}^n$  时,由于直接采用其 4 邻域  $y^n$  空间均值,使得 NN-NUC 算法呈现了空间低滤波的特性,当序列图像中场景静止时,会出现目标边缘的退化问题.这是因为神经网络算法是将 4 邻域均值作为对校正后真值的估计,对于场景中同一区域内部由于信号在空间上是缓变的,这样的估计是合理的,但处于图像边缘及其边缘附近的像素来说则是不合理的.在场景保持运动的过程中,由于图像边缘的位置在不断变化,随着时域上的迭代,这种不合理的估计不会对某一像素位置校

正系数更新带来异常影响,但当场景变为静止时,边缘处像素位置的校正系数会由于这样的不合理估计产生异常更新.

文献 [7] 从场景中边缘信息获取的角度出发,分析了上述问题出现的原因,并提出了采用边缘指导的神经网络自适应智能型校正算法 (ED-NN-NUC) 来消除目标退化和伪像问题.该算法在自适应非均匀校正过程中,自适应地提取当前帧校正后图像边缘信息,以此指导校正参数的更新环节.该算法在能准确获取场景边缘信息的前提下,能较好地抑制目标边缘的退化和伪像,较好地保留了弱小亮目标,只是在运算速度方面较慢.

文献 [8] 分析了红外焦平面阵列非均匀性噪声的空间频率特性,指出空间低频噪声为其中的主要成分.针对传统空域自适应校正方法去除低频空间噪声存在的不足,提出采用一点校正与神经网络自适应校正相结合的方法.该方法在空间低频噪声占优时能获得较好的校正效果,但存在目标退化问题.

## 2 组合校正算法

### 2.1 组合校正算法流程

基于上述对相关神经网络校正算法的分析,提出以下组合校正算法.

#### (1) 校正预处理模块

首先,采用文献 [8] 的方法,对探测器进行校正预处理,即用探测器采集若干帧均匀辐照的图像,然后时域平均作为背景帧图像.这样的采集很容易实现,可以盖上探测器的盖子或者使探测器对着干净的天空或其它均匀背景成像若干帧即可.假设背景帧为  $N_{ij}(\phi_0)$ , 其空间均值为  $\overline{N_{ij}(\phi_0)}$ . 利用基于场景的无效像元检测算法<sup>[9]</sup>结合背景帧进行无效像元检测,将检测结果存储于坏元模板 BC\_Model 中,完成校正预处理工作.此处采用基于场景的动态失效像元检测方法,对文献 [9] 方法进行改进,分别统计  $x$  与  $y$  方向的图像信息,这样可以检测出两相邻像素均为坏元的情况.

#### (2) 粗校正模块

将原始的带有非均匀性的图像第  $n$  帧位置  $(i, j)$  的灰度值  $N_{ij}^n(\phi)$  减去背景帧对应位置的灰度值  $N_{ij}(\phi_0)$ , 即:

$$X_{ij}^n(\phi) = N_{ij}^n(\phi) - N_{ij}(\phi_0) = G_{ij}^n(\phi - \phi_0), \quad (6)$$

$X_{ij}^n(\phi)$  只剩下由于增益响应引起的非均匀性,同时读取坏元模板 BC\_Model,对坏元位置的像素值进行 4 邻域平均替代处理,完成粗校正.

(3) 精校正模块

此模块主要利用神经网络校正算法对粗校正剩余的增益非均匀性进行补偿,校正公式为:

$$Y_{ij}^n(\phi) = a_{ij}^n X_{ij}^n(\phi) \quad (7)$$

$$a_{ij}^{n+1} = a_{ij}^n - 2\mu_{ij}(n) X_{ij}^n(\phi) (Y_{ij}^n(\phi) - f_{ij}^n) \quad (8)$$

其中,采用新的自适应迭代更新步长,实现对目标退化的抑制.新的步长表达式如下:

$$\mu_{ij}(n) = Ka / (1 + \sigma_{ij}^2(n)) \quad (9)$$

其中,  $\mu_{ij}(n)$  为第  $n$  帧中  $(i, j)$  位置对应的迭代步长,  $Ka$  为迭代步长的最大值,  $\sigma_{ij}^2(n)$  为第  $n$  帧中  $(i, j)$  位置邻域内的方差,  $K$  为方差影响系数.通过这样的方法来计算迭代步长主要受到基于边缘指导的神经网络算法和加权系数校正法<sup>[10]</sup>的启示,利用边缘点与目标内部邻域方差的区别来调节迭代步长的大小.由于边缘点的邻域方差较大,因此对应的迭代步长则较小,表示校正系数的更新较慢甚至不更新,由此阻止场景静止时校正系数更新异常,达到抑制目标退化和伪像的目的.  $K$  的设置主要为了调节方差对步长的影响程度.此方法较之边缘指导的校正法有较快的运算速度.文献[11]中同样提到了自适应调节步长的思想,但其出发点与本文不同,它主要考虑通过得到较快的收敛速度来改变步长,而本文主要力求实现在加快收敛速度的同时对目标退化进行抑制.

最后加上背景帧图像的空间均值  $N_{ij}(\phi_0)$ ,完成精校正处理

$$S_{ij}^n(\phi) = Y_{ij}^n(\phi) + N_{ij}(\phi_0) \quad (10)$$

组合校正算法流程图如图 1 所示.

2.2 实验结果与分析

在红外探测系统中,对弱小目标的检测和识别是我们关心的重要问题,因此,对含有该类目标的红外图像自适应非均匀性校正成为研究重点.为说明综合处理校正算法的性能,本节采用了从实际 128 × 128 规格 LW MCT RFPA 所采集到的 823 帧序列图像,采集帧率为 100 帧/秒.场景为室外夜晚天空冷背景下的飞机弱小亮目标以及房屋和树木.在该序列图像获取前一个小时左右采集到一帧干净天空背景的背景帧  $N_{ij}(\phi_0)$ ,并由此计算  $N_{ij}(\phi_0)$  和坏元模板 BC\_Model

图 2 为预校正处理环节所得的背景帧图像  $N_{ij}(\phi_0)$  和基于该帧自适应检测出的坏元模板 BC\_Model 图 3 为四种不同校正算法的比较,图像序列中从第 302 帧到 315 帧,由于探测器与飞机目标随动,飞机目标表现静止于图像中 (61, 71) 位置,因此选取了该序列图中第 311 帧图像,传统神经网络算

法在该帧容易出现目标退化现象.图 3(a) 为校正前的原始图像;图 3(b) 为现场两点定标校正和基于国家标准<sup>[12]</sup>坏元检测法处理的结果,白色实线标记框内为目标点.从图 3(b) 中可以看出,此方法校正效果较好,但图中位于 (113, 78) 的一个坏元(白色虚线标记框内)没有检测出来,该坏元对弱小目标检测有一定的不利影响.图 3(c) 为文献[8]算法的校正结果,白色实线标记框内飞机目标由于静止,目标边缘处校正系数更新异常导致目标退化.图 3(d) 为文献[7]与文献[8]结合的校正结果,图 3(e) 为文献[7]与文献[8]结合的校正算法中边缘提取的结果.可以看出,白色实线标记框内的弱小目标被保留了,这是由于加入边缘信息的指导,目标退化得到抑制.图 3(f) 为本文综合校正算法处理结果,白色标记框内飞机目标同样被保留了.该算法结合背景帧与坏元模板的信息,对剩余的增益非均匀性进行了校正,自适应的步长调整有效地抑制了目标退化,新的坏元模板检测出了位于 (113, 78) 的坏元,并进行了邻域补偿.

为进一步比较四种校正算法的性能,从多个方面对它们进行了综合评价,主要包括:单帧小目标信噪比(第 311 帧)、是否有目标退化现象、坏元处理能力和自适应算法收敛所需帧数和时间(包括算法运行时间和图像采集时间).

a 小目标信噪比计算公式如下:

$$SNR = 20 \log_{10} \left( \frac{S - \mu_0}{\sigma_0} \right) \quad (11)$$

SNR 为小目标信噪比,单位为 dB.其中的  $S$  是目标的亮度均值或者峰值,  $\mu_0$  为背景均值,  $\sigma_0$  为背景标准差.

b 为衡量三种自适应校正算法的收敛性能,特

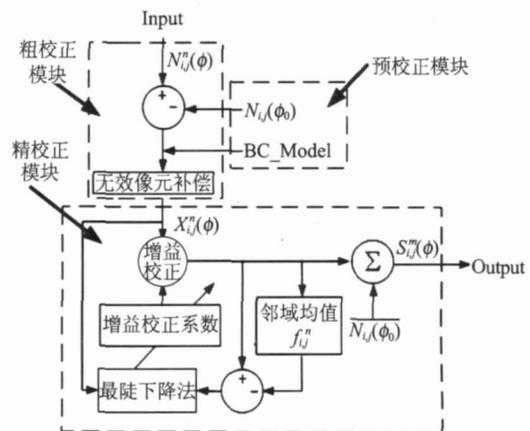


图 1 本文组合校正算法流程图

Fig 1 Block diagram of combinational correction algorithm

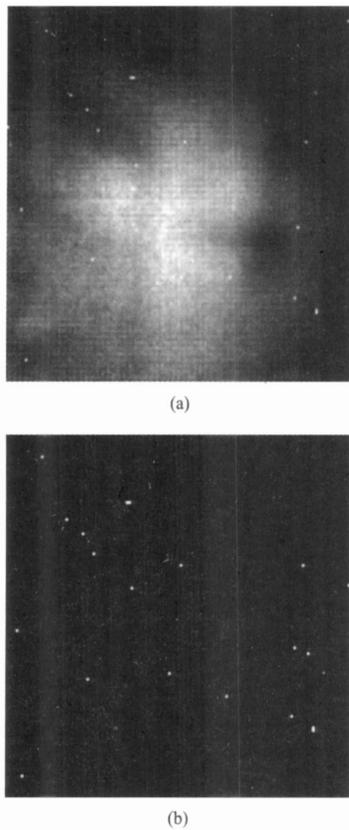


图 2 预校正处理中背景帧图像和坏元模板  
Fig 2 The background Frame and BC\_Model in the pre-correction processing

定义第  $n$  帧图像中均方根误差函数  $Err^n$  如下:

$$Err^n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N e_{i,j}^n}{M \times N}} \quad (12)$$

其中,  $e_{i,j}^n$  的定义如前式 (3) 所示, 3 种算法的比较如图 4 所示.

通过对表 1 分析比较发现, 两点校正算法可以得到比较高的校正精度, 无目标退化现象, 但该算法

表 1 4 种算法综合性能比较

比较指标	两点定标校正法	文献 [7] 与文献 [8] 结合的方法	文献 [8] 的方法	本文综合校正法
单帧小目标信噪比 (db)	11.50	10.91	1.47	10.31
目标化	无目标退化	无目标退化	有目标退化	无目标退化
坏元处理能力	有一个坏元无法去除	较好地去除坏元	较好地去除坏元	较好地去除坏元
自适应算法收敛所需帧数 (帧)		310	300	200
自适应算法收敛所需时间 (s)		4.61	3.48	2.54

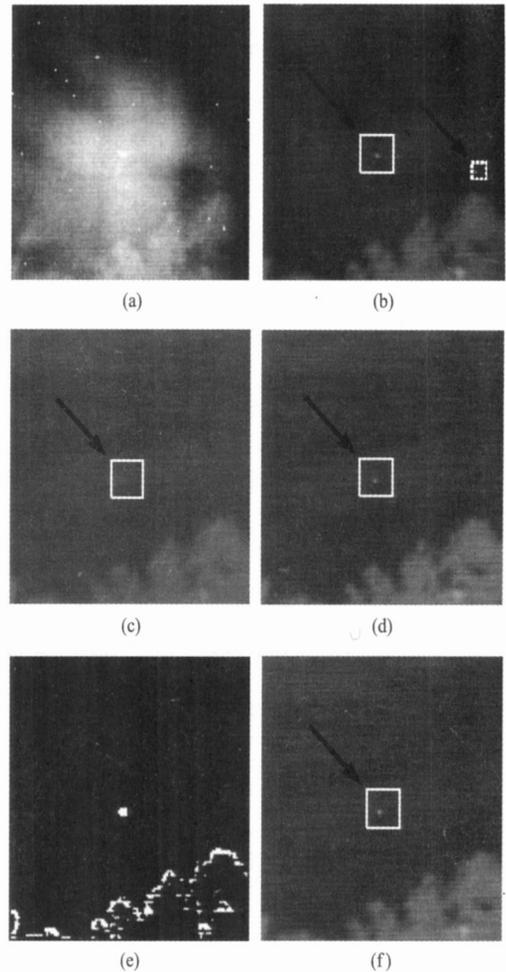


图 3 4 种校正算法处理结果比较 (第 311 帧)  
Fig. 3 Comparison of the results of four different correction algorithm (Frame 311)

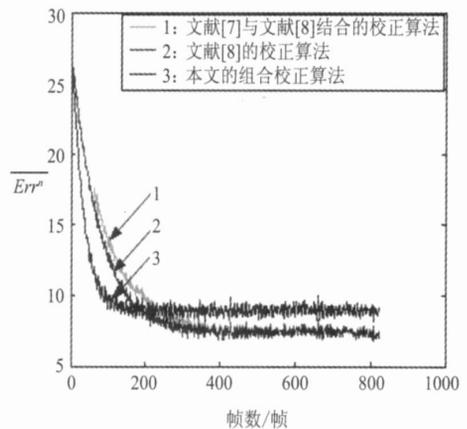


图 4 3 种自适应算法收敛性能比较  
Fig. 4 Comparison of the convergence of three adaptive algorithms

需要定标黑体, 增加了探测器的结构复杂度, 而且需要周期性的定标, 自适应能力较差. 文献 [7] 与文 (下转 52 页)

## REFERENCES

- [1] YN Shi-min, XIANG Li-bin, ZHOU Jin-song, *et al* Research on nonuniformity correction of RFPA based on radiation source scaling[J]. *Acta Photonica Sinica* (殷世民, 相里斌, 周锦松, 等. 辐射源标定红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究. 光子学报), 2008, 37(5): 992—995.
- [2] Wang Yue-ming, Chen Jian-xin, Liu Yin-nian, *et al* Study on two-point multi-section RFPA nonuniformity correction algorithm[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王跃明, 陈建新, 刘银年, 等. 红外焦平面器件二点多段非均匀性校正算法研究. 红外与毫米波学报), 2003, 22(6): 415—418.
- [3] CHANG Ben-kang, CAI Yi *Infrared Imaging Arrays and System* [M]. Beijing: Science Press (常本康, 蔡毅, 编著. 红外成像阵列与系统. 北京: 科学出版社), 2006: 58—63.
- [4] SHI Yan, ZHANG Tian-Xu, LI Hui, *et al* New approach to nonuniformity correction of RFPA with nonlinear response[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (石岩, 张天序, 李辉, 等. 一种考虑红外焦平面器件非线性响应的非均匀性校正方法. 红外与毫米波学报), 2004, 23(4): 251—256.
- [5] Wilhelm Isoz, Thomas Svensson, Ingnar Renhom Nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5783: 949—960.
- [6] Yan Shi, Tian-xu Zhang, Zhi-guo Cao, *et al* A feasible approach for nonuniformity correction in RFPA with nonlinear response[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46(4): 329—337.
- [7] QU Hui-ming, CHEN Qian A theoretical model on infrared focal panel arrays binary nonlinear nonuniformity[J]. *Acta Electronica Sinica* (屈惠明, 陈钱. 红外焦平面阵列二元非线性的非均匀性理论模型. 电子学报), 2008, 36(11): 2150—2153.
- [8] SUN Lian-jun, ZHANG Jun-ju, WANG Shi-yun, *et al* Research on operating temperature characteristic of uncooled microbolometer detector[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙恋君, 张俊举, 王世允, 等. 非制冷微测辐射热计探测器工作温度特性研究. 红外与毫米波学报), 2007, 26(3): 232—236.
- [9] GB/T 17444 1998 The technical norms for measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays [S] (GB/T 17444 1998 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范).

(上接 26 页)

献 [8] 结合的方法可以良好地抑制目标退化, 但算法收敛所需时间较长, 边缘检测的运算量较大, 不易硬件实现. 文献 [8] 的方法的收敛速度较快, 但存在目标退化现象. 本文算法有效地补偿了坏元, 能抑制目标退化, 在算法收敛所需帧数和时间方面优于另外两种方法.

### 3 结论

分析了传统神经网络非均匀性校正算法时空域处理过程中产生目标退化的原因, 在总结比较已有校正算法的基础上, 提出了含有三个模块的组合校正算法. 运用含有弱小目标的实际红外图像对算法进行了验证, 结果表明, 其目标退化抑制能力、坏元处理能力、算法收敛速度都达到了较好的水平.

## REFERENCES

- [1] Scribner D A, Sarkady K A, Caulfield J T, *et al* Nonuniformity Correction for Staring IR Focal Plane Arrays Using Scene-Based Techniques[C]. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays*, SPIE, 1990, 1308: 224—233.
- [2] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, *et al* Adaptive Retina-like Preprocessing for Imaging Detector Arrays[C]. *Proc IEEE* 1993, 1955—1960.
- [3] Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R, *et al* Adaptive Nonuniformity Correction for IR Focal Plane Arrays Using Neural Networks[C]. *Infrared Sensors: Detectors, Electronics, and Signal Processing*, SPIE, 1991, 1541: 100—109.
- [4] Harris J G Continuous-Time Calibration of VLSI Sensors for Gain and Offset Variations[C]. *Proc SPIE* 1995, 2474: 23—32.
- [5] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity Correction Using the Constant-Statistics Constraint: Analog and Digital Implementations[C]. *Proc SPIE* 1997, 3061: 895—905.
- [6] Harris J G, Chiang Y M. Minimizing the Ghosting Artifact in Scene-Based Nonuniformity Correction[C]. *Proc SPIE* 1998, 3377: 106—113.
- [7] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan Eliminating the “ghosting” artifact and target fade-out in adaptive nonuniformity correction for RFPA[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序, 石岩. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法中目标退化与伪像的消除方法. 红外与毫米波学报), 2005, 24(5): 335—340.
- [8] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan, CAO Zhi-Guo Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in RFPA and the important of spatial adaptive nonuniformity correction technique[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. 红外与毫米波学报), 2005, 24(4): 255—260.
- [9] Li Huaqiong, Chen Qian, Cao Wenkun Dynamic detection and compensation algorithm of defective pixels for RFPA[J]. *Infrared and Laser Engineering* (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法. 红外与激光工程), 2006, 35(2): 192—196.
- [10] Cao Zhiguo, Wei Luogang, Zhang Tianxu, *et al* Approach based on neural network for nonuniformity correction for RFPA[J]. *Infrared and Laser Engineering* (曹治国, 魏络刚, 张天序, 等. 基于神经网络法的焦平面器件非均匀性校正技术研究. 红外与激光工程), 2000, 29(1): 65—68.
- [11] Yang Shaolin, Yu Hui-min Scene-based nonuniformity correction algorithm in focal plane arrays[J]. *Journal of Zhejiang University* (Engineering Science) (杨少林, 于慧敏. 基于场景的焦平面阵列非均匀性校正算法研究. 浙江大学学报(工学版)), 2006, 40(7): 1150—1153.
- [12] BG/T 17442 1998 The technical norms of measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays[S]. (国标 GB/T 17442 1998 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范).