基于扩展全变分的红外焦平面阵列非均匀性校正方法

吴泽鹏^{1,2} 贾宏光¹ 宣 明¹ 朱明超¹ 郭玲玲^{1,2} 杨 磊¹

(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中国科学院大学,北京 100049

摘要 针对传统的基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法收敛速度慢和校正精度不高的缺点,提出了一种 基于扩展全变分的红外焦平面阵列非均匀性校正方法。在分析全变分算法的图像去噪性能的基础上,针对运动的 红外图像序列,扩展了全变分的应用范围。通过最小化非均匀校正后图像的全变分,利用最陡下降法,得到计算增 益量校正因子和偏移量校正因子的迭代公式。针对校正图像存在的鬼影现象,设计了一种自适应阈值控制的鬼影 消除方法。实验表明:相较于目前已有的方法,该方法有效地去除了原始红外图像的固定图案噪声,较大程度地保 留了图像细节信息,提高了图像质量。

关键词 图像处理;红外焦平面阵列;非均匀性校正;全变分;最陡下降法 中图分类号 TN21; TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0304001

Nonuniformity Correction Algorithm for Infrared Focal Plane Arrays Based on Extended Total Variation

Wu Zepeng^{1,2} Jia Hongguang¹ Xuan Ming¹ Zhu Mingchao¹ Guo Lingling^{1,2} Yang Lei¹

⁽¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Traditional scene-based nonuniformity correction algorithms for infrared focal plane array suffer from two major drawbacks: slow convergence rate and low correction accuracy. Aiming at these problems, a new method based on extended total variation is proposed to correct the nonuniformity for infrared focal plane arrays. Based on the analysis of total variation-based de-noising performance, the scope of total variation is extended for motional infrared image sequences. By minimizing the total variation of corrected images, iterative formula to compute the gain and offset factors is obtained using steepest descent method. For eliminating the ghosting effect, an adaptive threshold method is designed. The experiments show that compared with the existing methods, this method can effectively remove the noise in original infrared images and largely retain image information at the same time. The image quality is therefore improved.

Key words image processing; infrared focal plane array; nonuniformity correction; total variation; steepest descent method

OCIS codes 040.3060; 110.3080; 110.4280; 110.6820

1 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^[1],被广泛应用于国防、森林防 火、医疗等各个领域。由于制造工艺及工作环境等因素影响,IRFPA 各探测元的响应度不一致,导致输出图像存在叠加的固定图案噪声(FPN)^[2],且

收稿日期: 2013-05-20; 收到修改稿日期: 2013-08-22

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:吴泽鹏(1988-),男,硕士研究生,主要从事红外图像非均匀校正、红外图像增强等方面的研究。

E-mail: wuzepeng@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 宣 明(1956—),男,研究员,博士生导师,主要从事 MEMS 技术、精密机械等方面的研究。 E-mail: xuanm@ciomp.ac.cn FPN 随着时间和环境变化缓慢漂移。为此,有效地 实现非均匀校正是提高 IRFPA 成像质量的关键。

国内外的非均匀性校正(NUC)方法大致可分 为两类^[3]:基于黑体标定(BBNUC)和基于场景的非 均匀性校正(SBNUC)。BBNUC 利用温度分布均 匀的红外热源(黑体)实现 FPN 的去除,其中最为常 用的算法是两点标定法(TPC)^[4-5]。尽管 BBNUC 方法的准确度较高,但该方法需周期性地重新标定。 SBNUC 因能克服 BBNUC 方法的缺点^[6]而得到了 普遍重视。根据探测器输出像素的统计特性, Hayat 等^[7]提出了恒定统计的校正方法;通过对理 想图像的估计, Torres 等^[8]提出了基于 Kalman 滤波 的非均匀性校正方法;Scribner 等^[9]提出了基于神经 网络^[10]的最小均方(LMS)校正(NN-NUC),文献 [11-12]通过自适应步长设置,加快了 NN-NUC 的 收敛速度(FA-NUC);利用全变分(TV)的去噪性 能,Vera 等^[13]提出了基于全变分的校正方法(TV-NUC);假设不考虑增益因子,Ratliff 等^[14]提出了代 数类的方法。

尽管上述算法在一定条件下均能较好地去除图 像的固定图案噪声,但普遍存在收敛速度慢、校正精 度不高、鬼影现象难以完全去除等缺点。为此,本文 提出了基于扩展全变分的红外焦平面阵列非均匀性 校正方法。首先介绍了算法的基本原理,接着利用 扩展的全变分同时求解单帧图像变化量以及帧间图 像的运动情况。通过最小化非均匀校正后图像的全 变分,利用最陡下降法,分析得到计算增益量校正因 子和偏移量校正因子的迭代公式,并阐述该算法自 适应调整收敛速度的原理。针对校正过程中静止图 像序列中细节容易丢失的缺点,设计了一个算法执 行的自动阈值控制方法。最后通过实验结果和对 比,分析了该方法的性能。

2 基本原理

2.1 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:

 $Y_{ij}(n) = A_{ij}X_{ij}(n) + B_{ij} + \eta_{ij}(n)$, (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*)表示位于(*i*,*j*)探测元的辐射 照度,*Y_{ij}(n*)为探测元对应的输出值, $\eta_{ij}(n)$ 为对应 的随机噪声。 A_{ij} 和 B_{ij} 为探测元位于(*i*,*j*)探测元的 非均匀性增益量因子和偏移量因子。 非均匀性校正算法是利用探测器的读出值 Y_{ij}(n)以及通过计算或者估计得到的非均匀系数 A_{ij}和B_{ij}来获取真实的红外辐射照度X_{ij}(n),其非 均匀性校正模型为

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

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

2.2 全变分图像去噪

基于 TV 的图像去噪模型首先由 Rudin 等^[15] 提出。由于全变分去噪模型在去噪的同时能够较好 地保存图像的边缘特征,使得图像剖面的质量得到 很大的改善,现已经成为图像去噪及复原领域中最 为有效的方法之一。

假定 *u* 为原始清晰图像,*u*₀ 为被噪声污染的图像,即有:

$$u_0(x,y) = u(x,y) + u_{no}(x,y), \quad (x,y) \in \Omega,$$
(3)

式中 u_{no}表示具有零均值,方差为 σ² 的随机噪声,Ω 为图像的定义域。通常存在噪声的图像的 TV 比无 噪图像的 TV 明显增大,因而最小化 TV 可以消除 图像噪声。基于 TV 的图像降噪过程可归结为如下 最小化问题:

$$\min V_{\mathrm{T}}(u) = \int_{\Omega} \sqrt{|\nabla u|} \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y = \int_{\Omega} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y,$$

s. t.
$$\int_{\Omega} u \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y = \int_{\Omega} u_0 \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y,$$
$$\frac{1}{|\Omega|} \int_{\Omega} (u - u_0)^2 \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y = \sigma^2, \qquad (4)$$

式中V_T即全变分。最小化(4)式等价于求解下式:

$$J(u) = \int_{\Omega} \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \mathrm{d}x \mathrm{d}y + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} (u - u_0)^2 \mathrm{d}x \mathrm{d}y,$$
(5)

式中第1项为正则化项,对图像平滑和去噪起到关键作用,第2项为保真项,它可以保留图像的特征和降低图像失真度。λ为规整参数,与噪声水平有关。由(5)式导出 Euler-Lagrange 方程:

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) + \lambda(u - u_0) = 0, \quad (6)$$

式中 $\nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right)$ 可视为非线性各向异性的扩散方程,其扩散行为依靠 $\frac{1}{|\nabla u|}$ 实现,且其扩散行为主要发生在图像边缘的切线方向,能够较好地保留图像细节。

- 3 基于扩展全变分的 IRFPA 非均匀 性校正算法设计
- 3.1 NUC 算法设计

根据 2.2 节的全变分去噪模型,将其模型扩展 到存在固定图案噪声的红外图像上。对于任一帧图 像,(5)式转换为

$$J(\hat{X}) = \sum_{i,j} \sqrt{(\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{i-1,j})^2 + (\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{i,j-1})^2} + \frac{\lambda}{2} (\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{ij}^0)^2, \qquad (7)$$

$$J(\hat{X}) = \sum_{i,j} \sqrt{(\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{i+1,j})^2 + (\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{i,j+1})^2} + \frac{\lambda}{2} (\hat{x}_{ij} - \hat{x}_{ij}^0)^2.$$
(8)

在红外图像的非均匀校正过程中,处理的对象 不再是一幅单独的图像,而是连续的红外图像序列。 因为红外图像序列的前后帧能保持很好的连续性, 本文在保留原有平滑项的同时,扩展了全变分平滑 项的范围:

$$J[\hat{X}(n)] = \sum_{i,j} \sqrt{\Psi[\hat{X}_{ij}(n)]} + \frac{\lambda}{2} (\hat{X}_{ij} - \hat{X}_{ij}^{0})^{2},$$

$$\Psi[\hat{X}_{ij}(n)] = [\hat{X}_{ij}(n) - \hat{X}_{i-1,j}(n)]^{2} + [\hat{X}_{ij}(n) - \hat{X}_{i,j-1}(n)]^{2} + [\hat{X}_{ij}(n) - \hat{X}_{ij}(n-1)].$$
(9)

$$\Re(2) \text{ : } \mathcal{K}(0) \text{ : } \mathcal{H} \text{ : } \mathcal{H} \text{ : } G_{ij} \text{ : } \mathcal{H} O_{ij} \text{ : } \mathcal{R} \text{ : } \mathcal{H} \text{ : } \mathcal{H}$$

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{G}_{ij}} = \frac{\left[3\hat{X}_{ij}(n) - \hat{X}_{i-1,j}(n) - \hat{X}_{i,j-1}(n) - \hat{X}_{ij}(n-1)\right]}{\sqrt{\Psi[\hat{X}_{ij}(n)]}} Y_{ij}(n) + \lambda[G(n) - G_0]Y_{ij}(n),$$

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{O}_{ij}} = \frac{\left[3\hat{X}_{ij}(n) - \hat{X}_{i-1,j}(n) - \hat{X}_{i,j-1}(n) - \hat{X}_{ij}(n-1)\right]}{\sqrt{\Psi[\hat{X}_{ij}(n)]}} + \lambda[G(n) - G_0].$$
(10)

利用最陡下降法求解(9)、(10)式得

$$\hat{G}_{ij}(n+1) = \hat{G}_{ij}(n) - \mu \frac{\hat{X}_{ij}^{0}(n+1) - \hat{T}_{ij}(n+1)}{\sqrt{\Psi[\hat{X}_{ij}^{0}(n+1)]}} Y_{ij}(n+1) - \mu \lambda[G(n) - G(n-1)]Y_{ij}(n+1),$$

$$\hat{O}_{ij}(n+1) = \hat{O}_{ij}(n) - \mu \frac{\hat{X}_{ij}^{0}(n+1) - \hat{T}_{ij}(n+1)}{\sqrt{\Psi[\hat{X}_{ij}^{0}(n+1)]}} - \mu \lambda[G(n) - G(n-1)],$$
(11)

式中,

$$\hat{T}_{ij}(n+1) = \left[\hat{X}^{0}_{i-1,j}(n+1) + \hat{X}^{0}_{i,j-1}(n+1) + \hat{X}_{ij}(n)\right]/3,
\hat{X}^{0}_{ij}(n+1) = \hat{G}_{ij}(n)Y_{ij}(n+1) + \hat{O}_{ij}(n),$$
(12)

式中 μ 为设置的步长。本文算法在求解第(n+1)个增益量估算因子和偏移量估算因子时,采用了第(n+1)帧的图像数据Y和第n次迭代得到的偏移量校正估算因子 $\hat{O}_{ij}(n)$ 和增益量校正估算因子 $\hat{G}_{ij}(n)$ 。此前文献 [5-13]中的算法的迭代公式都直接采用前一帧校正后的图像来作为当前帧的T(n)近似估算,这是不合理的。

同理从(8)式开始推导亦可得到

$$\hat{G}_{ij}(n+1) = \hat{G}_{ij}(n) - \mu \frac{\hat{X}^{0}_{ij}(n+1) - \hat{T}^{*}_{ij}(n+1)}{\sqrt{\Psi^{*} [\hat{X}^{0}_{ij}(n+1)]}} Y_{ij}(n+1) - \mu \lambda [G_{ij}(n) - G_{ij}(n-1)] Y_{ij}(n+1),$$

$$\hat{O}_{ij}(n+1) = \hat{O}_{ij}(n) - \mu \frac{\hat{X}^{0}_{ij}(n+1) - \hat{T}^{*}_{ij}(n+1)}{\sqrt{\Psi^{*} [\hat{X}^{0}_{ij}(n+1)]}} - \mu \lambda [G_{ij}(n) - G_{ij}(n-1)],$$
(13)

式中,

$$\begin{split} \hat{T}_{ij}^{*}\left(n+1\right) &= \left[\hat{X}_{i+1,j}^{0}\left(n+1\right) + \hat{X}_{i,j+1}^{0}\left(n+1\right) + \hat{X}_{ij}\left(n\right)\right]/3, \\ \hat{X}_{ij}^{0}\left(n+1\right) &= \hat{G}(n)Y(n+1) + \hat{O}(n), \end{split}$$

 $\Psi^* [\hat{X}^{0}_{ij}(n)] = [\hat{X}^{0}_{ij}(n) - \hat{X}^{0}_{i+1,j}(n)]^2 + [\hat{X}^{0}_{ij}(n) - \hat{X}^{0}_{i+1,j}(n)]^2 + [\hat{X}^{0}_{ij}(n) - \hat{X}_{ij}(n-1)]^2.$ (14) 由(11)~(14)式可知,当输入图像的区域较为平坦时,计算得到的期望值可信度高,故而(12)式中的 $k_{ij} = \frac{\mu}{\sqrt{\Psi[\hat{X}_{ij}(n)]}}$ 值较大,收敛速度较快;反之,当图像区域细节变换较大时,步长值 k_{ij} 较小,收敛速度慢, 较好地保留了细节。至此,得到了一个自适应步长设置的非均匀性校正因子求解的迭代方法。另外,在实验 中若单独使用(11)式或(13)式存在着算法的各向异性,校正后图像效果不够理想,参考文献[13],在实际应用中将交替使用(11)、(13)式消除此影响。

3.2 鬼影消除

为较好地去除图像的鬼影现象,参考了文献[12]中的阈值设置方法:

$$k_{ij} = \begin{cases} \frac{\mu}{\sqrt{\Psi[\hat{X}_{ij}(n)]}}, & |\hat{Y}_{ij}(n) - \hat{Z}_{ij}(n-1)| > T\\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

$$\hat{Z}_{ij}(n) = \begin{cases} \hat{Y}_{ij}(n), & |\hat{Y}_{ij}(n) - \hat{Z}_{ij}(n-1)| > T\\ \hat{Z}_{ij}(n-1), & \text{else} \end{cases}.$$
(15)

文献[12]中 T 设置为一恒定值,并建议设置为 T=20。在实验中该设置存在不足:1)相同 T 值的设置, 对不同场景的执行效率差别非常大;2)容易导致平坦区域的收敛速度减慢。本文在文献[12,16]的基础上, 设置了一种自适应门限:

$$k_{ij} = \begin{cases} \frac{\mu}{\sqrt{\Psi[\hat{X}_{ij}(n)]}}, & |\hat{Y}_{ij}(n) - \hat{Z}_{ij}(n-1)| > 2[\hat{X}_{ij}(n) - \hat{M}_{ij}(n)], \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$
$$\hat{Z}_{ij}(n) = \begin{cases} \hat{Y}_{ij}(n), & |\hat{Y}_{ij}(n) - \hat{Z}_{ij}(n-1)| > 2[\hat{X}_{ij}(n) - \hat{M}_{ij}(n)], \\ \hat{Z}_{ij}(n-1), & \text{else} \end{cases},$$
(16)

式中 \hat{M} 为 \hat{X} 经过低通滤波后得到的结果。(16)式 的自动阈值设置较好地解决了上述两个问题。该方 法在去除鬼影的同时,算法的收敛速度亦得到保障。

4 实验结果及对比

为了验证算法的有效性,利用提出的算法分别 对人工合成的红外仿真数据和真实的红外图像序列 进行处理,并与 NN-NUC、FA-NUC 和 Vera 等^[13] 的 TV-NUC 算法进行对比。NN-NUC、FA-NUC 是基于神经网络的经典方法,得到广泛的应用;而 Vera 等^[13]的 TV-NUC 则同样采用了全变分去噪 处理。

在实验中存在算法的迭代步长设置问题:迭代 步长影响着算法的收敛速度,但是各算法的迭代步 长皆不是常数。为正确比较各个算法的处理效果, 设计了两种方案:1)在保证算法处理过程中不出现 较强鬼影现象的前提下,选择较大的步长;2)对同一 个场景处理的时候,保证四种算法的设置步长的平 均值相同。实验证明,两种方案都有效且结论相似。 本文采用第二种设计方案。

为了客观分析图像的非均匀校正效果,参考文 献[2-14,17]使用均方误差(RMSE)、峰值信噪比 (PSNR)以及图像光滑度ρ作为评价指标。假定 *X* 和 *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:

$$R_{\rm RMSE} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i}^{M} \sum_{j}^{N} (X - \hat{X})^{2}}, \qquad (17)$$

$$R_{\rm PSNR} = 20 \lg \left(\frac{2^b}{R_{\rm RMSE}} \right). \tag{18}$$

在不能准确获取无 FPN 的图像场景时,可采用 图像光滑度 ρ 评价校正后的图像质量:

$$\rho(\hat{X}) = \frac{\|h_1 \hat{X}\|_1 + \|h_1^T \hat{X}\|_1}{\|\hat{X}\|_1}, \quad (19)$$

其中 $h_1 = [1, -1]$ 为水平模板, h_1^T 为垂直模板。 $\|\cdot\|_1$ 表示矩阵的 *L*1 范数。 ρ 值越小, 图像效果越好。

此外,为客观分析算法对图像序列的处理速度, 在 Intel Core i5-3470@3.2 GHz 处理器的计算机 Matlab 软件平台上,分别统计算法进行一次迭代所 需要的平均时间。

4.1 仿真结果及讨论

参考文献[11],利用 BBNUC 方法得到的红外 视频(假设其已经完全去除了固定图案噪声),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 1 为经过 500 帧后,四 种算法处理得到的图像,表 1 为对应的客观评价指标。



图 1 非均匀校正算法对仿真数据的处理结果。(a)原始图像;(d)固定图案噪声污染图像;(b) NN-NUC 算法; (c) FA-NUC 算法;(e) Vera 的 TV-NUC 算法;(f)本文算法

Fig. 1 NUC results on simulated FPN. (a) Original image; (d) corrupted image with the FPN; (b) NN-NUC;

(c) FA-NUC; (e) Vera's TV-NUC; (f) proposed Method

表1 客观指标对比表

Table 1 Comparison of evaluation indexes for simulated data

| Method | Original image | Corrupted image | NN-NUC | FA-NUC | Vera's TV-NUC | Proposed method |
|----------|----------------|-----------------|---------|---------|---------------|-----------------|
| RMSE | 0 | 30.2757 | 16.9910 | 11.2589 | 9.2572 | 7.0898 |
| PSNR /dB | $+\infty$ | 18.5089 | 23.5264 | 27.1009 | 28.7850 | 31.1182 |
| p | 0.0547 | 0.4867 | 0.2478 | 0.1122 | 0.0899 | 0.0695 |
| t / ms | _ | — | 20.776 | 60.885 | 41.020 | 42.654 |

从图 1 中可以看出,被 FPN 污染的图像(d)相对 原始的图像(a)清晰度下降很大。从实验结果可知, 四种处理方法都具有一定的噪声去除能力。其中 NN-NUC 和 FA-NUC 算法在迭代到第 500 帧时仍然 有较大的噪声,而 TV-NUC 算法和本文算法则能较 好地去除叠加的噪声,本文方法的处理结果在清晰度 上又优于 TV-NUC 算法。分析表 1 所列的校正后图 像客观指标:从算法运行时间 t 看出,四种方法均有 较快的处理速度,能在嵌入式系统中实现实时处理, 其中本文算法处理速度 与 TV-NUC 接近,比 FA-NUC 速度快,而慢于 NN-NUC;从 RMSE、PSNR 以 及 ρ 可知,本文算法的图像处理效果明显优于其他三 种方法,而 FA-NUC 和 TV-NUC 又比 NN-NUC 处理 效果好。综合分析,本文算法相较于其他三种方法性 能更优。

以上仅仅是从一帧图像上比较几种算法的性能,不具一般代表性。故重新计算了从非均匀校正 开始至第1500帧图像的峰值信噪比和图像平滑度, 其结果如图2和图3所示,可以看出,本文算法较其 他三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。











4.2 真实红外图像处理结果

为更加全面地比较算法的性能,将算法用于处 理未经非均匀校正处理的真实的红外图像。结果如 图 4 所示,其中图 4(a)~(c)正下方的数值表示图 像的平滑度[(19)式定义]。因未能准确得知未被固 定图噪声污染的图像,故不计算图像的 PSNR 和 RMSE。



(a) $\rho = 0.0855$

(b) *ρ*=0.0667

(c) $\rho = 0.0655$



图 4 非均匀校正算法对真实数据的处理结果。(a)真实红外图像;(b) NN-NUC 算法;(c) FA-NUC 算法; (d) Vera 的 TV-NUC 算法;(e) 本文算法;(f)图(a)和图(e)的残差

Fig. 4 NUC results on real infrared image. (a) Real infrared image; (b) NN-NUC; (c) FA-NUC;

(d) Vera's TV-NUC; (e) proposed method; (f) difference between (a) and (e)

从光滑度参量 ρ 可知, TV-NUC 和 FA-NUC 的处理效果相似,均优于 NN-NUC, 而本文方法又 优于 TV-NUC 和 FA-NUC;分析图像的实际显示 效果,经过 NUC 校正后的图像(b)~(e)均能较好 地消除原始图像的固定图案噪声,但是本文方法得 到的非均匀校正图像最为清晰,图像质量最高。

另外,计算经过本文方法处理后的图像与原始 未经校正的红外图像的残差,如图 4(f)所示,该图 几乎未包含任何原始图像中的场景信息。该结果表 明本文方法在较好地保留原有图像信息的前提下, 几乎完全去除了图像的固定图案噪声。

5 结 论

通过分析红外焦平面阵列的特性和全变分算法 的图像去噪性能,设计了一种基于场景的红外焦平 面阵列非均匀性自适应校正方法。该方法通过最小 化校正后图像的扩展全变分,计算得到图像序列的 增益量校正因子和偏移量校正因子的迭代公式。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:该方法无论直观效果还是 客观评价指标都优于现有的典型非均匀校正方法。 在有效去除红外图像中的固定图案噪声的同时,较 大程度保留了图像细节信息,提高了图像质量。

参考文献

- Xu Tianhua, Zhao Yigong. Analysis of scene-based techniques for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. J Infrared and Millimeter Waves, 2004, 23(4): 257-261.
 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 Xie Xufen, Zhang Wei, Zhi Xiyang, et al.. Scene-based assessment method for nonuniformity of infrared focal plane array [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0604001. 谢蓄芬,张 伟,智喜洋,等. 基于场景的红外焦平面阵列非均
 - 匀性评价方法[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0604001.
- 3 Yang Shaolin, Yu Huimin. Scene-based non-uniformity correction algorithm in focal plane arrays [J]. J Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(7): 1150-1153. 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 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(7): 1150-1153.
- 4 Li Jing, Wang Junzheng, Wang Shoukun, *et al.*. CCD nonuniformity adaptive correction method based on empirical mode decomposition [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2012-2016.

李 静,王军政,汪首坤,等. 基于经验模式分解的 CCD 器件自 适应非均匀性校正方法研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2012-2016.

5 Luo Fengwu, Wang Liying, Tu Xia, et al.. A real-time processing system based on field programmable gate array for infrared image [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 307-311. 罗凤武,王利颖,涂 霞,等. 基于现场可编程门阵列的高性能 红外热成像系统[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 307-311.

- 6 D R Pipa, E da Silva, C Paglian, *et al.*. Recursive algorithms for bias and gain nonuniformity correction in infrared videos [J]. IEEE Trans Image Processing, 2012, 21(12): 4758-4769.
- 7 M M Hayat, S N Torres, E Armstrong, *et al.*. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. Appl Opt, 1999, 38(5): 772-780.
- 8 S N Torres, M M Hayat. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(3): 470-480.
- 9 D A Scribner, K A Sarkady, M R Kruer, *et al.*. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks [C]. SPIE, 1991, 1541, 100-109.
- 10 Weixian Qian, Qian Chen, Guohua Gu. Minimum mean square error method for stripe nonuniformity correction [J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(5): 051003.
- 11 E Vera, S Torres. Fast adaptive nonuniformity correction for infrared focal-plane array detectors [J]. EURASIP J Applied Signal Processing, 2005, 2005, 1994-2004.

12 R C Hardie, F Baxley, B Brys. Scene-based nonuniformity

correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm [J]. Opt Express, 2009, 17(17): 14918-14933.

- 13 E Vera, P Meza, S Torres. Total variation approach for adaptive nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. Opt Lett, 2011, 36(2): 172-174.
- 14 B M Ratliff, M M Hayat, J S Tyo. Generalized algebraic scenebased nonuniformity correction algorithm [J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(2), 239-249.
- 15 L I Rudin, S Osher, E Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. Phys D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1-4): 259-268.
- 16 Junqi Bai, Qian Chen, Weixian Qian, et al.. Ghosting reduction in scene-based nonuniformity correction of infrared image sequences [J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(12): 1113-1116.
- 17 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.

栏目编辑: 何卓铭