

基于场景的红外非均匀性校正算法对比研究

张学峰¹, 陈宝国^{1,2}, 樊养余², 王巍^{1,2}

(1.中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2.西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 红外技术发展到今天, 红外凝视焦平面探测器阵列性能高、使用简单, 从而成为红外系统的主流。但是, 红外探测器的工艺和技术生产不出像可见光 CCD 那样均匀的红外器件, 红外探测器阵列的非均匀性一直是红外凝视探测器的主要缺陷。人们开发了多种非均匀性校正算法, 尤其是基于场景的自适应算法, 极大地弥补了探测器的非均匀性缺陷。但是到目前为止, 各种算法都有一定的局限性, 尚不能彻底解决非均匀性问题。针对目前常用的几种非均匀性校正算法, 包括时域高通滤波算法、神经网络算法、恒定统计量算法等, 在天空、地面等不同场景条件下进行了仿真测试, 对算法的实施效果进行了对比分析。

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 时域高通滤波算法; 神经网络算法; 恒定统计量算法; 空中场景; 地面场景; 算法仿真

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)09-0560-007

Comparison of Scene-based IRFPA Nonuniformity Correction Algorithms

ZHANG Xue-feng¹, CHEN Bao-guo^{1,2}, FAN Yang-yu², WANG Wei^{1,2}

(1.China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Nowadays IRFPA (infrared focal plane array) is the main trend in infrared system. Because of technique limitation, IRFPA can't be as perfect as visible detectors. Nonuniformity has been the main defect of IRFPA for a long time. Many nonuniformity correction algorithms were developed in past decades, especially scene-based NUC algorithm. These algorithms remedy the defect of IRFPA largely. Up to now, every algorithm has its limitation and can't solve the nonuniformity problem thoroughly. In this paper, several NUC algorithms in common use, include temporal high-pass filter algorithm, neural network algorithm, constant-statistics constrain algorithm and moving scene-based algorithm, are evaluated with sky, cloud, and water surface scenes, and comparative analysis is done with the results of these algorithms.

Key words: infrared focal plane array, nonuniformity correction, temporal high-pass filter algorithm, neural network algorithm, constant-statistics constrain algorithm, air field, surface field, algorithms simulation

0 引言

红外凝视焦平面阵列从其诞生之日起就一直饱受非均匀性的困扰。尽管红外探测器的制造工艺经过几十年的改进, 探测器的非均匀性问题得到了极大的改善, 但仍未能在器件的生产阶段完全解决问题。早期的 MCT 探测器和 InSb 器件非均匀性曾经高达 30%, 现在一般可以达到 10%~5%或更小。尽

管如此, 由于红外焦平面探测器的性能已经接近理论极限, 其输出动态范围可达 80 dB, 即便是 5%的非均匀性也已经成为系统性能的瓶颈。一般情况下, 即使经过定标校正的红外成像系统的残留非均匀性空间噪声仍然大于时域噪声, 成为红外系统性能的瓶颈。尤其在图像目标检测领域, 与闪烁的电子噪声相比, 残留非均匀性引起的空间噪声的特性与目标特性更接近, 更容易引起虚警。因此为充分利用

收稿日期: 2013-01-12; 修订日期: 2013-05-17.

作者简介: 张学峰, (1984-), 男, 湖北松滋人, 工程师, 主要研究方向为红外图像预处理、红外目标检测跟踪技术。E-mail: xuefeng_26@163.com.

通讯作者: 陈宝国, (1970-), 男, 研究员, 主要研究方向为红外成像系统设计。E-mail: chenbg@netease.com.

探测器的性能,提高系统的作用距离,必须提高非均匀性校正的效果,尽可能消除非均匀性。

最常用的非均匀性校正算法是两点校正算法。两点校正算法的前提有2个:一是响应的线性,二是响应的时域稳定性。红外焦平面探测器基本符合这两点。同时,两点校正算法也是最简单最实用的算法,因此,在红外系统中得到了普遍应用。但是,严格意义上红外焦平面探测器的响应只是近似线性,校正后的效果就会随着工作点的不同而不同,在2个定标温度点附近,残留非均匀性较小,而在2个温度点之外,残留非均匀性会快速上升。探测器响应的时域稳定性也有限,所以随着时间的增加,探测器会有漂移,残留非均匀性也会增加,红外系统就需要重新进行定标。红外系统的重新标定需要一定的外部条件支持或内置黑体等设备,都会增加系统的复杂性。

鉴于定标校正的问题,国内外实验室研究了很多基于场景的自适应校正算法,如时域高通滤波法^[1]、恒定统计量法^[2]、神经网络方法^[3]、基于运动图像的校正算法^[4]、Kalman滤波算法^[5]、通用代数自适应校正算法^[6]等,在非均匀性校正方面取得了很多的进展,根据采用的校正算法的不同,对系统或对图像的随机性、运动特性有这样那样的使用要求,因此现在非均匀性校正工作的重点有2个方面,一是根据不同的应用条件选择合适的算法,二是对算法改进或研究新的算法使其满足使用要求。现代高速DSP和FPGA技术的发展也为复杂算法的实现提供了现实的可能性,也有很多人^[7-8]对算法的硬件实现进行了探讨。本文从天空、水面和地面等不同场景的红外图像入手,对不同的算法进行仿真,对比各种算法对不同场景的适应性。

1 算法描述

1.1 时域高通滤波算法

由于两点校正算法不能校正系统的 $1/f$ 噪声,严重影响了系统的校正精度,在很多追求极限性能的应用中(例如军用的目标自动探测系统)显然是不够的。为此Honeywell公司的P.M. Narendra等人提出了时域高通滤波法^[1]。这种方法要求探测器系统的增益是均匀的,实际上是不可能的,因此更一般的做法是先对增益进行定标校正,使增益均匀,或直接采用两点校正,再通过时域高通滤波来校正系统的偏移。系统的框图如图1。不考虑增益校正,其公式如下:

$$y_{ij}(n) = x_{ij}(n) - f_{ij}(n) \quad (1)$$

$$f_{ij}(n) = \frac{1}{m} \cdot x_{ij}(n) + (1 - \frac{1}{m}) f_{ij}(n-1) \quad (2)$$

考虑到这时会产生负数,不符合一般图像数据的习惯。可以用式(3)来替代式(1)。 O 为一常数或全帧的平均值,不随像素位置改变。

$$y_{ij}(n) = x_{ij}(n) - f_{ij}(n) + O \quad (3)$$

由于 $1/f$ 噪声是一种低频噪声,用这种方法可以有效地消除 $1/f$ 噪声。

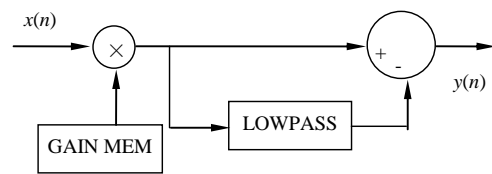


图1 高通滤波算法框图

Fig.1 Temporal high-pass filter algorithm structure

1.2 恒定统计量算法

在时域高通滤波的方法中,采用探测器单元的时间平均值作为其偏移,实际上就是认为在随机运动的图像中各点的时间统计平均值(数学期望)是相等的。推广一下,在随机运动图像中经过一段比较长的时间后,所有的探测单元具有相同的时间统计特性,即其各阶统计量相等。这就是P. M. Narendra^[1]在提出统计量方法时的前提假设。时域高通滤波算法中的低通滤波值 $f(n)$ 可以认为是对变量 x 的数学期望的一种逼近。

根据这个原理,Harris和Yu-Ming Chiang^[2]提出了恒定统计量算法,该算法基于图像中各点的一阶统计量(均值)和二阶统计量(方差)是相等的。从而得到了新的校正公式:

$$y_{ij} = \frac{A(x_{ij} - \bar{x}_{ij})}{|x_{ij} - \bar{x}_{ij}|} + B \quad (4)$$

与时域高通滤波算法相同,采用2个IIR低通滤波器分别来估计两个均值: \bar{x}_{ij} (即式(2))和 $\sqrt{x_{ij} - \bar{x}_{ij}}$ (二阶统计量),该算法的计算量不大,但在公式(4)中有除法运算,由于一般的DSP没有硬除法指令,所以除法运算是该算法实现的瓶颈。

1.3 神经网络算法

神经网络算法^[3]是在充分研究了人眼的视网膜的视觉反应后提出的。它模拟了人视网膜对光线的调整反应,同时可以跟踪探测器的增益漂移和偏移漂移。神经网络算法的原理如图2^[3]所示。

图2中, X_{ij} 是凝视红外成像系统第 j 行第 i 列

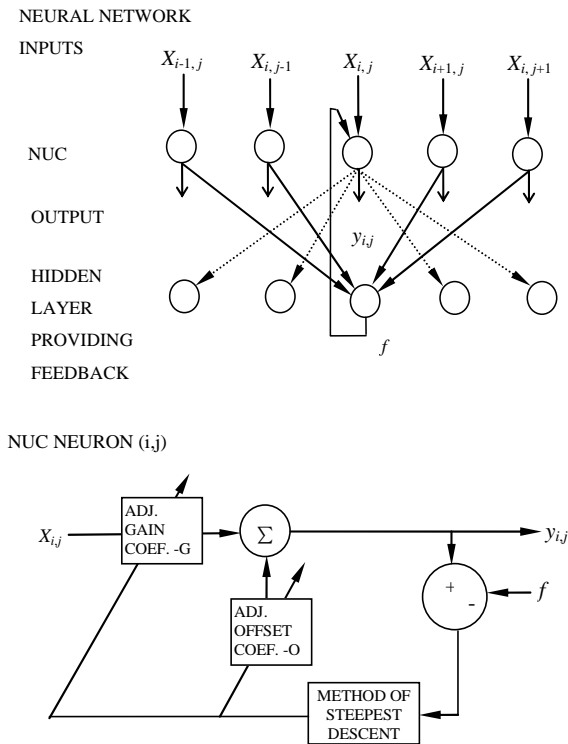


图 2 神经网络算法示意图

Fig.2 Neural network NUC algorithm structure

单元对外界景物的响应（一般已经经过两点校正）， y_{ij} 则是校正后的输出， f 是对 (i,j) 点的真值的估计函数，算法中 f 采用像元四邻域像元的平均值，系数的更新过程与BP神经网络（或自适应滤波）相同，具体过程如下：

第一步：输入第 n 帧图像，对第 n 帧图像进行两点校正并输出：

$$y_{ij} = G_{ij}x_{ij} + O_{ij} \quad (5)$$

第二步：计算邻域平均值作为 (i,j) 点的真值：

$$f_{ij} = (y_{i,j-1} + y_{i-1,j} + y_{i,j+1} + y_{i+1,j})/4 \quad (6)$$

则误差函数：

$$F_{i,j}(G_{i,j}, O_{i,j}) = (y_{i,j} - f_{i,j})^2 \quad (7)$$

第三步：采用最速下降法，对系数进行迭代：

$$G_{i,j} = G_{i,j} - \alpha \frac{\partial F_{i,j}}{\partial G_{i,j}} = G_{i,j} - 2\alpha x_{i,j}(y_{i,j} - f_{i,j}) \quad (8)$$

$$O_{i,j} = O_{i,j} - 2\beta \frac{\partial F_{i,j}}{\partial O_{i,j}} = O_{i,j} - 2\beta(y_{i,j} - f_{i,j}) \quad (9)$$

回到第一步，对第 $n+1$ 帧进行同样操作。

1.4 基于运动图像配准的校正算法

神经网络算法是一个标准的自适应滤波算法，本身比较成熟。仔细分析，误差的来源主要在真值的估计上。把图像作为随机场，邻域的平均是该点的无偏估计，但前提是图像是随机的，这也是对图

像随机性要求的来源。另外，相邻单元的响应也有非均匀性和电子噪声，选择好参数 α ，噪声本身在自适应滤波中也可以得到很好的控制，随着迭代的进行，相邻单元非均匀性的影响也会逐步得到削弱。

在实际应用中，图像的随机性很难得到保证。所以，考虑对真值估计算法进行改进。通常的热像仪、导引头和红外吊舱等设备都是工作在连续视频的形式，场景的运动是很容易保证的。基于运动图像配准的校正算法^[4]的基础在于不同像素对场景内同一个点的响应应该是相同的，因此采用了配准后相邻帧图像的对应点作为真值，其它运算与神经网络算法基本相同，在算法中采用了双向的更新策略，即先将第 n 帧的图像作真值更新第 $n-1$ 帧的系数，再将第 $n-1$ 帧作为真值更新第 n 帧的系数。在文献[9]中对真值的估计作了进一步的改进，采用了前4帧的对应点的平均值作为真值，加快了收敛速度。本文仍采用了[4]中的算法。

2 仿真试验与结果分析

到目前为止，还没有通用的非均匀性校正算法。每种算法都有其适用的条件。为了研究算法对不同场景的适应性，在Microsoft Visual C++6.0环境下编程实现了前述的4种算法，分别对空中、水面、地面景物等不同的场景进行了算法测试，其结果如下。

第1个测试的是晴空背景，红外图像采用的是 128×128 的长波图像。由于晴空背景下图像过于均匀，无法通过图像配准获取图像的运动信息，所以没有对基于运动图像的算法进行仿真。图3是序列

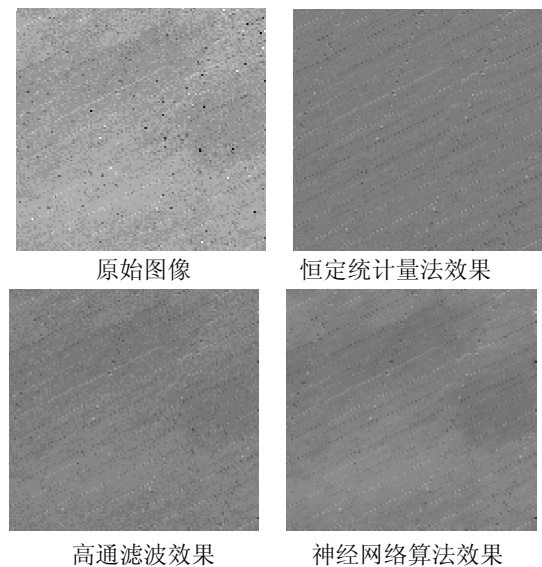


图 3 第 50 帧天空背景校正效果对比

Fig.3 50th Frame sky infrared image and NUC results comparison

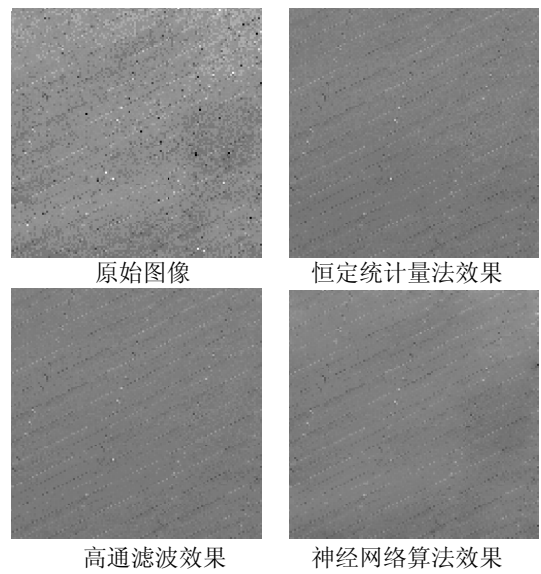


图 4 第 250 帧天空背景校正效果对比
Fig.4 250th Frame sky infrared image and NUC results comparison

到 50 帧时的校正效果,图 4 是 250 帧时的效果,图 5 是仿真过程中图像方差的变化过程。晴空背景最大的特点是均匀并与运动无关。原始图像中,探测器的非均匀性和电子噪声成为图像的主要成分。从最终结果看,3 种算法都有较好的效果,校正后的图像残留的大部分都是电子串扰引入的噪声点。一般情况下,图像景物的灰度分布与探测器非均匀性之间没有相关性,那么,原始图像本身的方差就包含景物和非均匀性 2 部分,经过非均匀性校正之后,如果图像没有产生失真,图像方差的下降就证明图像残留非均匀性的下降。从图 5 图像方差变化对比看,高通滤波算法的方差下降最多,证明残留非均匀性越小,因此具有最好的效果。

第 2 个测试是天空云背景红外图像测试。采用的红外成像系统是 320×256 的中波热像仪。图 6 为

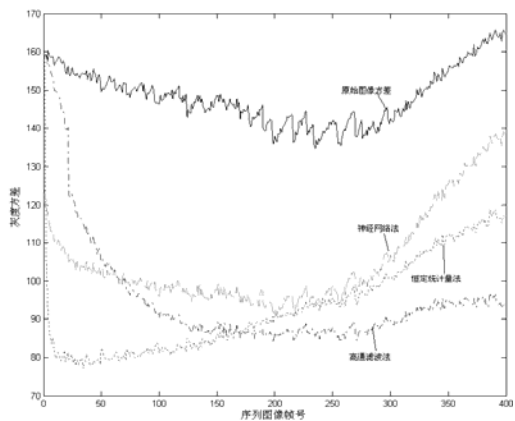


图 5 天空背景校正图像方差对比
Fig.5 Variance of sky infrared original and NUC images

第 50 帧的原始图像和校正图像,图 7、图 8 分别为第 250 和 400 帧的原始图像和校正图像。云背景图像的特点是空间频率低,几乎没有高频成分。由于原始图像已经经过了两点校正,所以非均匀性主要表现为孤立点,即空间高频。从图 6 可以明显看出,恒定统计量算法效果最差,其它几种算法效果都不错。到第 400 帧时,从图 8 可以明显看到,4 种算法都能把非均匀性的孤立点抑制掉,但恒定统计量算法和高通滤波算法结果出现了明显的失真,原始图像序列的左上角一直偏暗,被算法校正后灰度升高,达到与其它部分一致。基于运动图像的效果也变差,估计与云背景图像缺乏边缘或角点信息,图像配准精度变差有关。

图 9 展示了校正过程中图像方差的变化。神经网络算法与原始图像曲线非常接近,难于区分。与本序列中非均匀性主要是孤立点的现象一致。恒定统计量和高通滤波算法图像方差的大幅下降与图像失真有关。

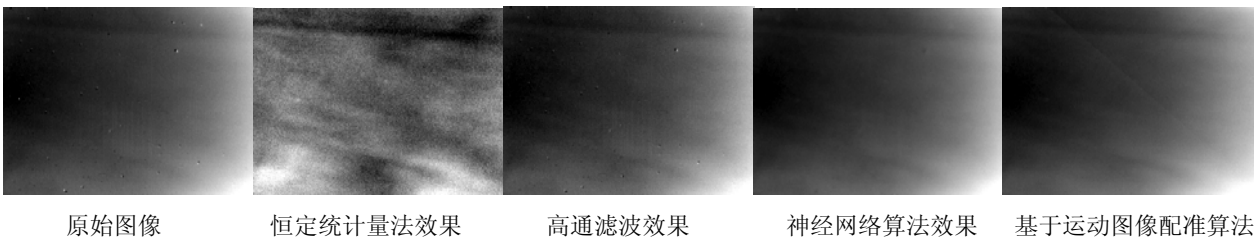


图 6 第 50 帧云背景校正效果对比
Fig.6 50th Frame cloud infrared image and NUC results comparison

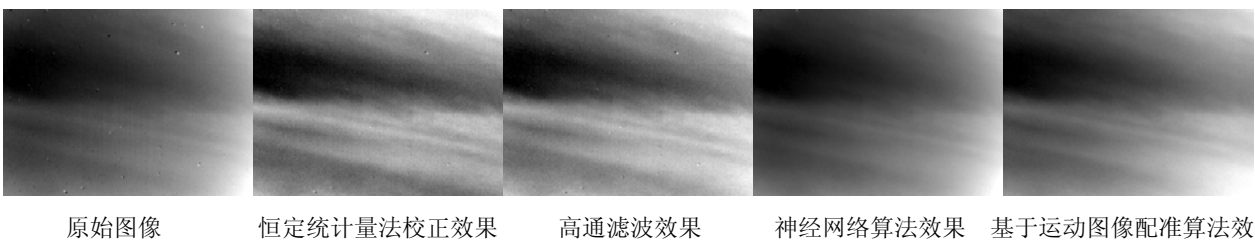


图 7 第 250 帧云背景校正效果对比
Fig.7 250th Frame cloud infrared image and NUC results comparison



原始图像 恒定统计量法校正效果 高通滤波效果 神经网络算法效果 基于运动图像配准算法效果

图 8 第 400 帧云背景校正效果对比 Fig.8 400th Frame cloud infrared image and NUC results comparison

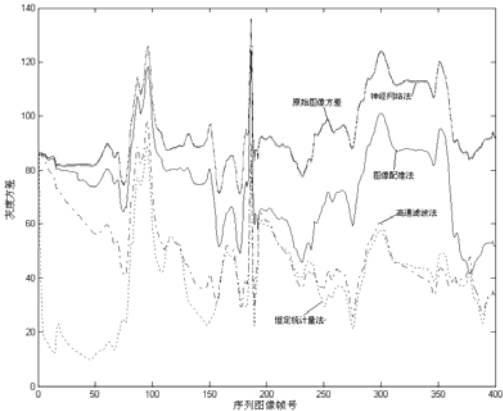
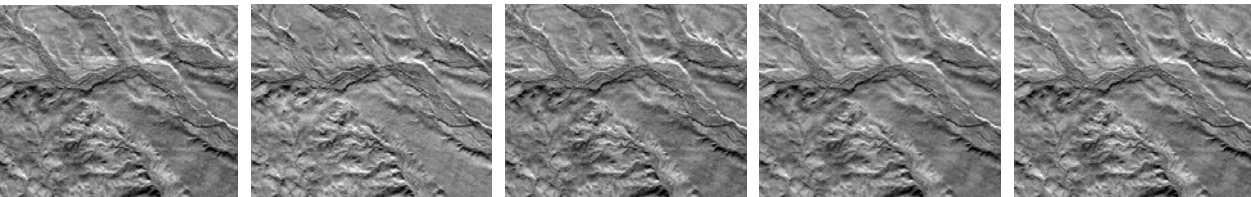


图 9 云背景校正图像方差对比

Fig.9 Variance of cloud infrared original and NUC images

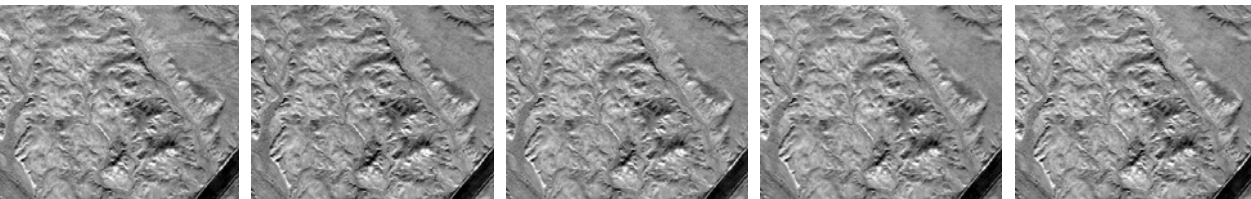
恒定统计量算法在开始校正的前期出现了图像恶化的现象，见图 6。分析原因，与算法采用的增益校正因子 $\left|x_{ij}-\bar{x}_{ij}\right|$ 有关，这个因子是通过对 $x_{ij}-\bar{x}_{ij}$ 的绝对值进行低通滤波获得的，而 \bar{x}_{ij} 又是通过对 x_{ij} 低通滤波获得的，导致了在开始阶段 \bar{x}_{ij} 的误差较大，从而导致 $\left|x_{ij}-\bar{x}_{ij}\right|$ 的误差也较大，引起了图像恶化。

第 3 个测试的是地面场景，选用的是戈壁背景，



原始图像 恒定统计量法校正效果 高通滤波效果 神经网络算法效果 基于运动图像配准算法效果

图 10 第 50 帧戈壁校正效果对比 Fig.10 50th Frame Gobi infrared image and NUC results comparison



原始图像 恒定统计量法校正效果 高通滤波效果 神经网络算法效果 基于运动图像配准算法效果

图 11 第 400 帧戈壁校正效果对比 Fig.11 400th Frame Gobi infrared image and NUC results comparison

采用的红外系统仍然是 320×256 的中波热像仪，由于采集时间离系统定标时间已经很长，而且环境温度变化剧烈，原始图像中在平坦区域可见明显的非均匀性的条纹。图 10 和图 11 分别是第 50 帧和第 400 帧的原始图像与校正图像，4 种算法都取得了较好的效果，在 400 帧时条纹基本消失。图 12 是校正过程的图像方差变化曲线，几条曲线纠缠在一起，表明算法的效果差别不大，与图像的直观效果一致。

最后测试的是水面背景，红外系统采用的仍是 320×256 的中波热像仪。由于环境温度的变化，水面带有明显的非均匀性的环状条纹，图像中还有部分的陆地，为基于运动图像算法的图像匹配实现提供了条件。图 13 是第 50 帧时的效果，恒定统计量算法出现了明显的图像劣化，原因与图 6 中的相同。到 400 帧时，见图 14，环状的非均匀性都受到了较强的抑制，但从直观感觉上，基于运动场景的算法效果略好一些。恒定统计量算法则出现了一定的失真，图像右侧的阴影消失。图 15 为图像的方差曲线，神经网络算法与原始图像基本重合，其它算法则有较大下降。恒定统计量算法下降幅度最大，与其图像失真有关，400 帧时原始图像右侧的阴影消失。

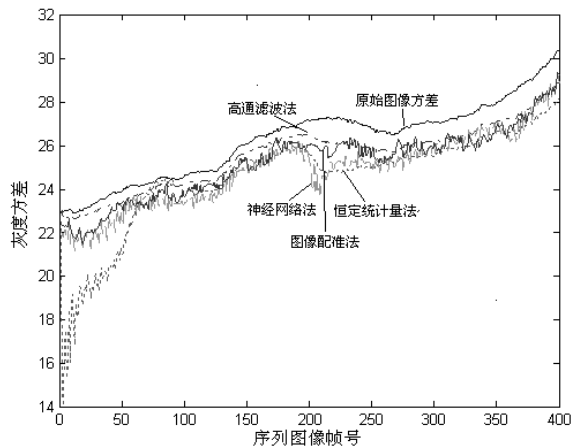
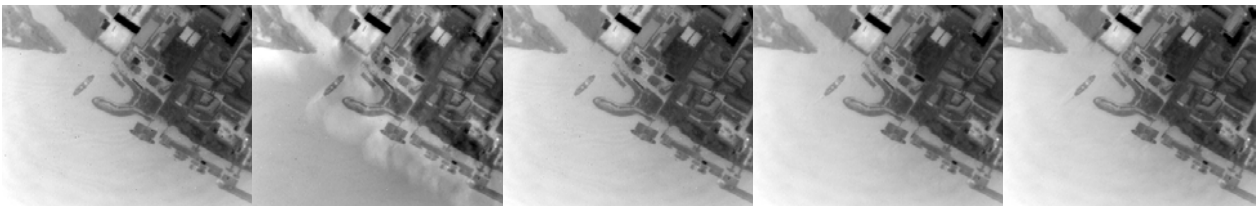


图 12 戈壁校正图像方差变化图

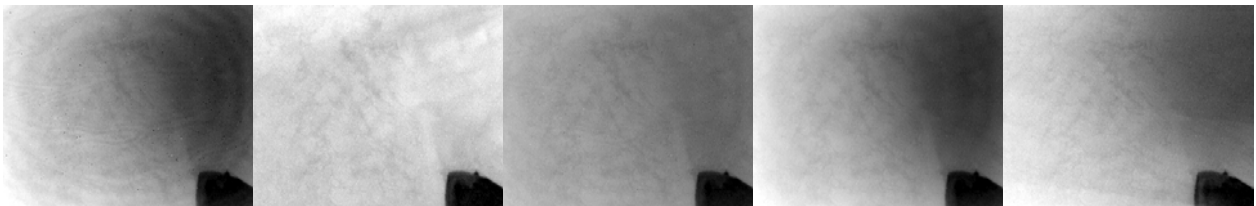
Fig.12 Variance of Gobi infrared original and NUC images



原始图像 恒定统计量法校正效果 高通滤波效果 神经网络算法效果 基于运动图像配准算法效果

图 13 第 50 帧水面校正效果对比

Fig.13 50th Frame water infrared image and NUC results comparison



原始图像 恒定统计量法校正效果 高通滤波效果 神经网络算法效果 基于运动图像配准算法效果

图 14 第 400 帧水面校正效果对比

Fig.14 400th Frame water infrared image and NUC results comparison

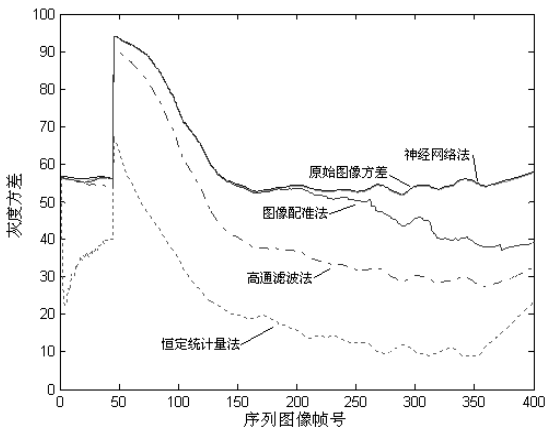


图 15 水面校正图像方差变化图

Fig.15 Variance of water infrared original and NUC images

3 结论

本文针对不同的非均匀性校正算法进行了仿

真, 仿真结果表明这些算法有如下特点: 1) 恒定统计量算法在算法的起始阶段经常会导致图像效果劣化, 对于开机就要求结果正确的红外成像系统需要采取一定的措施避免此问题; 2) 神经网络算法对空间频率较低的非均匀性收敛速度比较慢, 对空间频率较高的非均匀性有很好的效果; 3) 时域高通滤波算法对空间频率低和高的非均匀性都有较好的效果, 但其低通滤波器的 m 值 (见公式(2)) 对结果影响较大, m 值低会引起时域低频部分场景退化; 4) 基于运动图像配准的算法对图像运动速度比较敏感, 较高的速度下效果较好; 5) 图像细节比较丰富的场景, 例如戈壁, 大部分算法都有比较好的效果, 差别只是收敛速度的快慢。

综上所述, 红外成像系统设计需要根据应用要求选择合适的非均匀性自适应校正算法。对于简单的均匀背景, 采用时域高通滤波算法就可以达到较

好效果。如果成像系统只有高频非均匀性,神经网络算法是一个较好的选择。如果能够从系统角度解决相邻帧位移量的估计问题,基于运动图像配准的算法可以满足绝大部分的要求。未来非均匀性校正研究的重点有2个:一是提高算法对不同场景的适应能力,降低算法对场景的随机性的要求;二是增加智能判断,根据场景的不同特点,自动配置非均匀性校正算法,从而提高算法的综合性能。

参考文献:

- [1] Narendra P M. Reference-free nonuniformity compensation for IR imaging arrays[C]//*Proceedings of SPIE*, 1980, **252**: 10-17.
- [2] John G Harris, Yu-Ming Chiang. Nonuniformity correction using the constant-statistics constrain: analog and digital implementations[C]//*Proceedings of the SPIE*, 1997, **3061**: 895-905.
- [3] Scribner D A, Sarkady K A, Caufield J T, et al. Nonuniformity correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques[C]//*Proceeding of SPIE*, 1990, **1308**: 224-233.
- [4] Chen Baoguo, Fan Yangyu, Zhang Xuefeng, et al. Moving scene based nonuniformity correction algorithm[C]//*Proceeding of SPIE*, 2012, **8419**: 84191Q-1-84191Q-6.
- [5] Sergio N. Torres, Majeed M. Hayat. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays[J]. *Optical Society of America*, 2003, **20**(3): 470-480.
- [6] Bradley M Ratliff, Majeed M Hayat, J Scott Tyo. Generalized algebraic scene-based nonuniformity[J]. *Optical Society of America*, 2005, **22**(2): 239-249.
- [7] 陈宝国, 郑志伟, 黄士科, 等. 利用 FPGA 实现红外焦平面器件的非均匀性校正[J]. *红外与激光工程*, 2000, **29**(4): 55-57.
- [8] 高宇, 隋修宝, 陈钱, 等. 红外图像处理算法硬件实现验证系统[J]. *红外技术*, 2012, **34**(11): 621-628.
- [9] 陈宝国, 樊养余, 张学峰, 等. 红外焦平面阵列非均匀性校正的改进神经网络算法[J]. *红外技术*, 2012, **34**(12): 690-694.