

文章编号: 0253-2239(2007)09-1617-4

小波变换的红外焦平面阵列非均匀性校正算法*

秦翰林 周慧鑫 刘上乾

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘要: 红外焦平面阵列(IRFPA)的非均匀性是其应用中必须解决的技术难题之一。基于小波理论,提出了一种基于成像场景的红外焦平面非均匀性校正算法。该算法选择合适的小波函数对红外成像序列进行小波分解,而后对分解的信号计算出相应的统计量,从而得出红外焦平面非均匀性校正的偏置和增益校正系数,以此最终实现非均匀性校正。对真实红外序列图像的处理效果验证了该算法可较好地实现非均匀性校正。此外该算法对慢变化量具有较好的自适应性,可较好地抑制一般基于场景统计的非均匀性校正算法中出现的“人工虚影”的现象。

关键词: 成像系统; 红外焦平面阵列; 非均匀性校正; 离散序列小波变换; 红外成像

中图分类号: TN21; TN219 文献标识码: A

Nonuniformity-Correction Algorithm for Infrared Focal Plane Arrays Based on Wavelet Transform

Qin Hanlin Zhou Huixin Liu Shangqian

(School of Technical Physics, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: Nonuniformity of infrared focal plane arrays (IRFPA) is a key problem that must be solved in its applications. Based on the theory of wavelet transform, a scene-based nonuniformity-correction (NUC) technique for IRFPA is presented. In this algorithm, the infrared image sequence is decomposed by the discrete sequence wavelet transform with an appropriate wavelet function. Its corresponding statistics are calculated, and then coefficients of the offset and the gain for IRFPA NUC are achieved ultimately. The algorithm achieves good nonuniformity-correction capability, which is validated by experiments of real infrared imaging procedure. And the algorithm can auto-adapt to the slow-change parameters that affect the NUC and can restrain the “artificial ghost” in some degree that appears in other scene-base NUC methods.

Key words: imaging system; infrared focal plane arrays; nonuniformity correction; discrete sequence wavelet transform; infrared imaging

1 引 言

红外焦平面阵列成像系统具有结构简单、可靠性高、探测灵敏度高和系统工作帧频高等多方面的优点,但是红外焦平面阵列器件各探测单元响应特性之间普遍存在着非均匀性,在所成的图像上表现为固定图案噪声。它导致红外成像系统的温度分辨力和空间分辨力等性能显著下降,使其难以满足红

外成像系统的使用要求,因而工程中使用的红外焦平面阵列器件几乎都要采用相应的非均匀性校正技术^[1,2]。

近二十多年,非均匀性校正技术得到很大的发展,大致可以分成两大类,一类是基于参考辐射源的校正算法,如两点和多点校正技术^[1,2];另一类是基于场景的校正算法,如场景统计算法^[3]、时域高通滤

* 国家自然科学基金(60377034)资助课题。

作者简介: 秦翰林(1982—),陕西富平人,男,博士研究生,主要从事红外成像及信号处理、目标检测与跟踪方面的研究。
E-mail: hlqin@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 刘上乾(1937—),江西安义人,男,教授,博士生导师,主要从事光电成像和图像处理及其在图像测量、光电制导和光电对抗方面的应用。E-mail: shqliu@xidian.edu.cn

收稿日期: 2006-11-27; 收到修改稿日期: 2007-04-11

波器技术^[4]、神经网络算法^[4]、维纳滤波算法^[5]、卡尔曼滤波器算法^[6]等等。前一类算法不仅需要参考辐射源,而且难以对于探测器响应随时间的漂移的影响实施实时的校正。后一类算法计算增益和偏置校正参量的数据全部或部分来自于基于场景的估计,采用不同的现代信号处理技术来实现非均匀性校正。它们不需要参考源,而且不影响系统的正常工作。因此近些年来,这类算法受到了广泛关注^[7,8]。

本文利用离散序列信号的小波变换理论,提出了一种新的基于成像场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法。利用真实的红外序列图像进行了仿真实验分析。实验结果表明该算法可以较好地实现红外焦平面阵列的非均匀性校正,获得较好的非均匀性校正效果。

2 基于小波变换的非均匀性校正算法

2.1 离散序列的小波变换

离散序列的小波变换可以将离散时间信号分解为一系列分辨力下的离散逼近和离散细节,在工程应用中具有很重要的意义。通过 Mallat 算法,离散序列的小波变换可将一维离散信号 $s(t) \in V_j$ (J 为一确定整数) 分解成不同频带的分量。

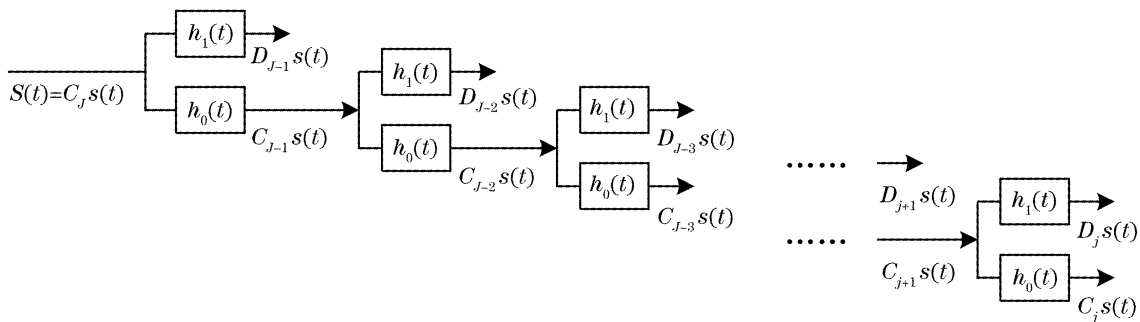


图 1 离散序列的小波变换滤波器组结构

Fig. 1 Configuration of the filter banks of the discrete sequence wavelet transform

将探测器单元 (m, l) 的序列响应信号 $s_{ml}(t)$ 作为滤波器组的第 0 级输入,各级低通滤波输出分别是 $s_{ml}(t)$ 在第 j ($j=1, 2, \dots, n$) 级分辨力下的离散逼近,而各级高通滤波输出则分别是 $s_{ml}(t)$ 在第 j 级分辨力下的离散细节信号。下标 ml 为探测器单元在红外焦平面阵列中的坐标位置,因为非均匀性校正处理是按探测器单元逐个进行的,所以为了表述简便,在下面的阐述中省略变量的下标 ml 。

离散逼近和离散细节可按 Mallat 的塔式算法由 C_j 递归分解得到

$$C_j = HC_{j+1} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} h_{k-2^n} c_{j,k}, \quad (3)$$

$$s(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_{j,k} \varphi_{j,k}(t) = \sum_{j=J_1}^{J-1} \sum_{k \in \mathbf{Z}} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) + \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_{J_1,k} \varphi_{J_1,k}(t), \quad (1)$$

其中数列 $\{c_{j,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 具有有限长度 N_j 。令

$$C_{J_1} s(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_{J_1,k} \varphi_{J_1,k}(t), \quad (2)$$

$$D_j s(t) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} d_{j,k} \psi_{j,k}(t),$$

其中 $C_{J_1} s(t)$ 是频率低于 2^{-J_1} 的信号分量,数列 $\{c_{j,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 称为在分辨力 2^{J_1} 下的离散逼近。 $D_j s(t)$ 是频率介于 2^{-j} 与 $2^{-(j-1)}$ 之间的信号分量,数列 $\{d_{j,k}\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 称为在分辨力 2^j 下的离散细节,即为小波变换。

2.2 基于小波变换的非均匀性校正算法

利用上述离散序列小波变换的分解算法,选择合适的小波,基于离散序列的小波变换的非均匀性校正算法的基本框架可以由图 1 所示的滤波器组来表示。其中 $h_0(k)$ 是滤波器组中低通滤波的冲激响应[相当于连续小波变换的尺度函数 $\varphi(t)$], $h_1(t)$ 是滤波器组中高通滤波的冲激响应[相当于连续小波变换中的小波函数 $\psi(t)$]。

$$D_j = GC_{j+1} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} g_{k-2^n} c_{j,k}, \quad (4)$$

$$j = J - 1, J - 2, \dots, J_n - 2, J_n - 1$$

其中数列 $\{h_k\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 和 $\{g_k\}_{k \in \mathbf{Z}}$ 是由相应所选的尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波函数 $\psi(t)$ 所确定的。

如此在时间域上将 $s(t)$ 分解到某一尺度 J_n ,即将信号 $s(t)$ 分解为低频(小于 2^{-J_n})的分量 $C_{J_n} s(t)$ 和频率介于 2^{-j} 与 $2^{-(j-1)}$ 之间的分量 $D_j s(t)$ ($j = J_1 - 1, \dots, J_n$)。 $C_{J_n} s(t)$ 反映的是信号 $s(t)$ 的基频分量。 $D_j s(t)$ 作为探测器单元响应信号 $s(t)$ 通过带通滤波器组的输出,不仅反映了空间频率的变化,也反映了红外焦平面阵列相机相对于景物运动的速度。

利用基于场景校正算法的理论^[3~8],在实际应用中,选择合适的尺度 J_n ,计算出 $C_{J_n}s(t)$ 的一阶统计量,即为该探测器单元偏置校正系数

$$O = E[C_{J_n}s(t)]. \quad (5)$$

而该探测器单元的增益校正系数可利用某一尺度下的 $D_j s(t) (j = J, J - 1, \dots, J_n - 1)$ 的二阶统计量经归一化求得

$$G = \left\{ \text{var}[D_{J_n}s(t)] / \sum_m \sum_n \text{var}[D_{J_n}s(t)] \right\}^{1/2}. \quad (6)$$

其中 $\text{var}[\]$ 表示方差。在实际算法处理中,分解尺度 J_n 的合理选择是非常重要的,它需要根据所选用的小波函数以及所处理的成像信号的特点,并通过实验和分析来确定的。

3 仿真实验

实验中采用的红外图像序列是由工作于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波长范围内的 320×240 像素的非制冷红外焦平面相机按照每秒 25 帧的速率采集的 1000 帧图像组成。算法仿真实验中采用的图像序列的长度为 128,利用 db3 小波函数分别进行了 2~6 级分解,分别计算出偏置和增益的校正系数,而后对图像实施非均匀性校正。算法实现中采用 Mallat 分解算法,可以使运算量得到有效的降低。图 2 给出了算法仿真实验流程。图 3 为一幅校正前的原图,手的热图被固定图案噪声所湮没而显得模糊不清。图 4(a)~图 4(e) 图分别是图 3 在 2~6 级小波分解下的校正图,可以看到被校正后,固定图案噪声在不同程度上得以消除,手的热图变得较为清晰。但是在不同的分解尺度下,所得到的校正效果是不同的,算法中所采用的分解级数需要根据具体的实验结果分析来确定。在本实验中,作 4 级分解所得到的处理效果相对最好,

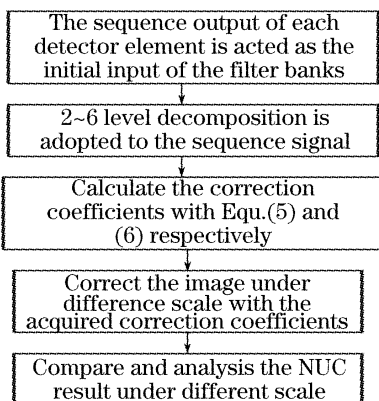


图 2 算法流程

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

非均匀性得到了较好的校正。

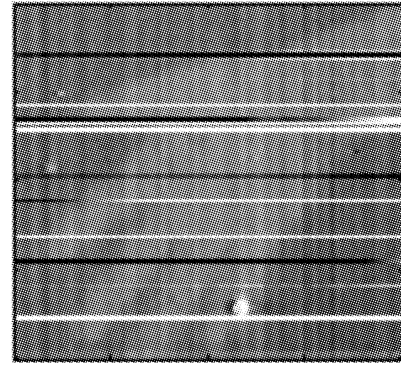


图 3 手的热像原图

Fig. 3 Raw thermal image of hand

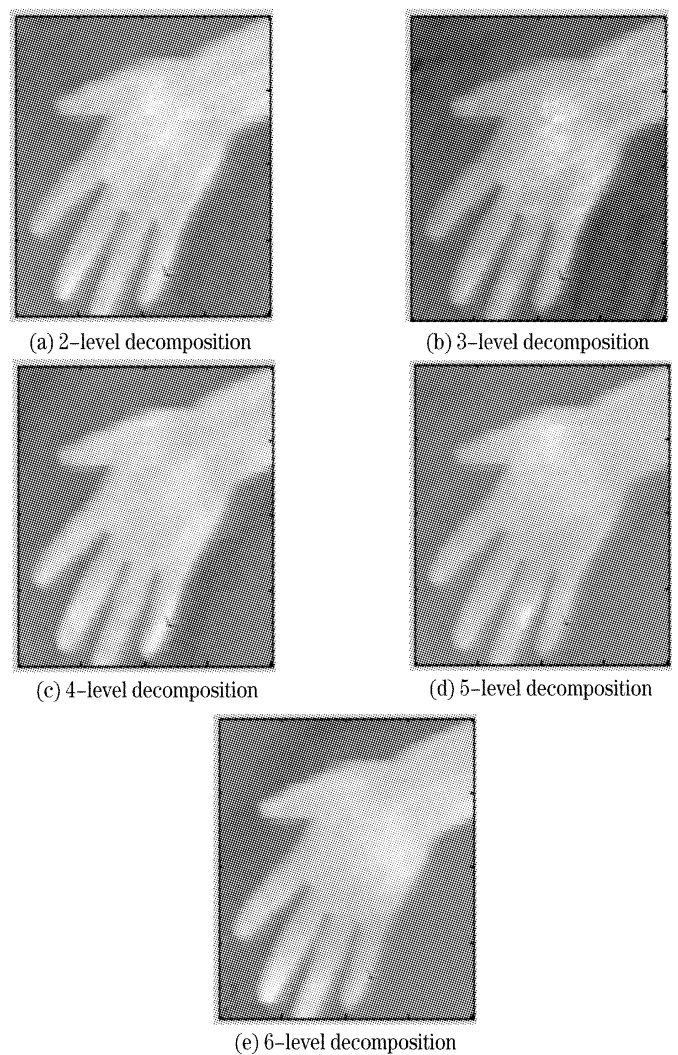


图 4 利用 db3 小波在不同分解级数下的校正效果

Fig. 4 Simulation results of nonuniformity correction under various decomposition series by db3 wavelet

此外,在一般基于场景统计的非均匀性校正算法校正后的图像中通常会出现不同程度的拖尾现象(即“人工虚影”),例如图 5 中给出的利用高通滤波非均匀性校正算法^[4]得到的校正图,从中可以看到具有较强的拖尾现象。而在利用 db3 小波进行 4 级分解所得到的校正图 4(c)中这种现象并不明显,这是因为本

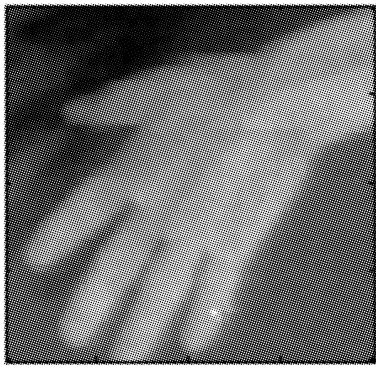


图 5 高通滤波法校正效果

Fig. 5 Result of nonuniformity correction by high-pass filter algorithm for slow variation (bias and gain coefficient in practical application as slow variation) has a good self-adaptability. This is also based on the superiority of the non-uniformity correction algorithm based on wavelet transform.

4 结 论

本文利用离散序列信号的小波变换理论,提出了一种基于成像场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法。利用真实的红外序列图像的处理效果验证了该算法可较好地实现红外焦平面阵列的非均匀性校正。此外该算法还对慢变化量具有较好的自适应性,可较好地抑制一般基于场景统计的非均匀性校正算法中出现的“人工虚影”现象。算法中小波函数和滤波器的构造对于不同的应用场合可有不同的选

择,如何最优地选择分解尺度 J_n 是我们下一步需要研究的问题。

参 考 文 献

- 1 Jonathan M. Mooney, Freeman D. Shepherd, William D. Ewing *et al.*. Responsivity nonuniformity limited performance of infrared staring cameras[J]. *Opt. Engng.*, 1989, **28**(11): 1151~1161
- 2 D. L. Perry, E. L. Dereniak. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(8): 1854~1895
- 3 J. G. Harris, Y. M. Chiang. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**(8): 1148~1151
- 4 D. A. Scribner, K. A. Sarkay, M. R. Kruer *et al.*. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1541**: 100~109
- 5 M. M. Hayat, S. N. Torres, E. E. Armstrong *et al.*. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(8): 772~780
- 6 S. N. Torres, M. M. Hayat, E. E. Armstrong *et al.*. A Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays sensors[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4030**: 196~205
- 7 Huixin Zhou, Shangqian Liu, Rui Lai *et al.*. Solution for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(15): 2928~2932
- 8 Jorge E. Pezoa, Sergio N. Torres. Multi-model adaptive estimation for nonuniformity correction of infrared image sequences[C]. *ICIAR 2004, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 3212: 413~420