

一种新的基于平稳小波变换的红外 焦平面非均匀性校正技术*

张峰, 刘上乾, 汪大宝

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘 要: 在分析固定图案噪音频率分布的基础上, 提出了一种利用平稳小波进行非均匀性校正的方法. 选择合适的小波函数对红外图像序列进行分解, 从而估计出非均匀性校正的增益和偏置系数, 最终实现红外焦平面阵列的非均匀性校正. 利用小波的多分辨性质, 提高了低频部分的频率分辨率, 有效的抑制了一般基于场景统计校正算法中易于出现的“人工鬼影”现象. 用真实的红外图像序列进行了处理, 实验证明了算法的优越性.

关键词: 成像系统; 红外焦平面阵列; 红外非均匀性校正; 平稳小波变换

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-2135-4

0 引言

红外焦平面阵列(Infrared Focal Plane Arrays, IRFPA)具有灵敏度高、探测能力强等优点, 已经成为红外热成像中的主流光电器件. 但是由于芯片材料、结构和器件工艺以及使用环境等因素, 使得探测元的响应不同, 产生非均匀性, 在图像上表现为固定图案噪音, 以致图像质量显著下降. 而红外信号的特点是高背景、低反差, 红外目标图像的对比度很低, 这样 IRFPA 的非均匀性产生的影响就不可忽视, 它严重影响了目标图像的清晰度, 甚至有可能将目标完全淹没^[1]. 所以, 工程应用的红外焦平面阵列器件大多要进行相应的非均匀性校正.

红外非均匀性校正分为两大类: 一类是基于参考辐射源的校正方法, 另外一类是基于场景统计的校正方法. 第一类校正算法虽然运算量小, 但是校正时需要参考辐射源^[2], 而且很难对随着时间漂移的影响进行校正; 第二类算法的校正系数基本上来自场景的估计, 采用不同的信号处理的方法进行校正^[3-9]. 此外基于场景的校正方法可以很好的抑制探测元响应度随着时间的漂移对非均匀性校正的影响, 因此近些年来这类算法受到了广泛的关注. 但是此类方法一般计算量较大, 而且存在难以去除的“人工鬼影”现象. ZHOU 和 QIN^[10]考虑小波的多分辨特性, 利用时域小波分解进行非均匀性校正, 在一定程度上抑制了“人工鬼影”现象, 遗憾的是, 此方法对

小波分解层次有较高的要求, 不同层次下非均匀性校正效果差别很大, 实际应用中有很大的限制.

本文采用探测元线性响应模型, 首先分析了固定图案噪音频率分布, 在此基础上利用小波的多分辨特性, 提出了一种利用平稳小波进行非均匀性校正的方法. 该算法首先将空间噪音中占主要成份的低频部分利用小波有效的估计出来, 且此部分对小波分解层次要求不高, 然后再将增益利用高频部分估计, 并设计一种简单有效选择小波分解层次的方法, 从而完成非均匀性校正.

1 基于平稳小波的非均匀性校正

1.1 平稳小波变换

平稳小波变换又称非抽取小波变换(Undecimated Wavelet Transform)^[11], 与经典的离散正交小波变换相比, 离散平稳小波变换的主要特点是冗余性和平移不变性, 能对连续小波变换给出一个更为近似的估计. 所以为了构造平移不变小波表示, 尺度 s 被离散化但是平移参量 u 不被离散化. 为了简化数值计算, 尺度沿着二进制序列 $\{2^j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 被采样. $f \in L^2(\mathbb{R})$ 的平稳小波变换定义为

$$Wf(u, 2^j) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi \left[\frac{(t-u)}{2^j} \right] dt = f * \overline{\Psi_{2^j}(u)} \quad (1)$$

$$\text{式中 } \overline{\Psi_{2^j}(u)} = \Psi_{2^j}(-t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \Psi \left[-\frac{t}{2^j} \right].$$

平稳小波变换可以将时域上的信号分解成一系列的分辨率下的逼近信号和细节信号, 通过多孔算法(a' trous)^[12], 将信号分解成不同频带的分量. 与正交小波变换不同, 在进行平稳小波变换时, 不进行下采样处理, 这样每次变换得到的逼近和细节系数长度就和原信号相同.

* 国家自然科学基金(60377034)资助

Tel: 13772117334

Email: cdmavsgprs@hotmail.com

收稿日期: 2008-06-04

修回日期: 2008-07-03

定义滤波器 H, G , 则 H_j, G_j 分别代表 H, G 在各个样本之间插入 $2^j - 1$ 个零所得到的滤波器, 则对于任何 $j \geq 0$,

$$a_{j+1}[n] = a_j * H_j[n] = a_j * G_j[n]$$

$$a_j[n] = (a_{j+1}[n] * \overline{H_j[n]} + d_{j+1} * \overline{G_j[n]}) / 2 \quad (2)$$

式中 a_{j+1} 为逼近信号, d_{j+1} 为细节信号. 平稳小波变换的基本框架如图 1.

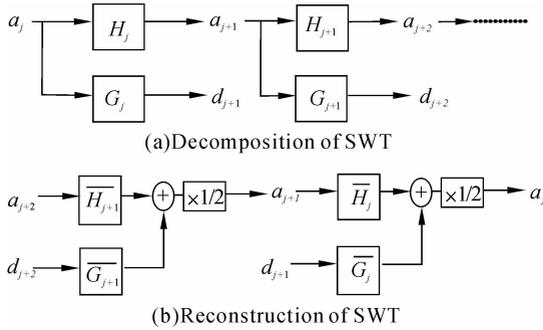


图 1 a trous 算法的具体流程

Fig. 1 Diagram of a trous algorithm

1.2 基于平稳小波的非均匀性校正算法

由于红外焦平面阵列的各个探测单元的响应随着时间变换缓慢, 并且探测单元内部的读出电路引起的闪烁噪声频率小于 20 KHZ 范围内^[13], 目标相对于背景则在像面上有较大的运动速度. 因此目标信号能量主要集中在高频部分, 而由探测元响应随时间的变化分量则集中在低频部分. 有文献表明 IRFPA 空间噪声分布有两个性质^[14]: 1) 由非均匀性引起的空间噪声其主要空间频率是低频部分. 2) 由增益非均匀性单独导致的空间噪声, 其空间高频部分所占比例有较大增加. 因此, 本文方法首先将低频噪声去除使得空间噪声只剩由增益非均匀性所导致部分, 然后再估计出增益值进行后续校正.

采用探测元线性响应模型

$$Y = GX + O \quad (3)$$

式中 G 为探测元的增益, O 为偏置, X 为探测元响应的理想输出, Y 为探测元响应的实际输出响应. 根据非均匀性产生的机制, 偏置 O 为缓慢变化分量, 故可以用信号的低频部分将偏置 O 估计出来, 增益 G 则可以利用高频分量的二阶统计量将其估计出来.

将探测单元 (m, n) 的序列响应 $Y_{mn}(t)$ 作为滤波器组的第 0 级输入, 则通过低通滤波器的输出 $C_j Y_{mn}(t)$ 是 $Y_{mn}(t)$ 在第 j ($j=1, 2, \dots$) 级分辨率下的逼近信号, 通过带通滤波器的输出 $D_j Y_{mn}(t)$ 是 $Y_{mn}(t)$ 在第 j 级分辨率下的细节信号. 这样 $C_j Y_{mn}(t)$ 反映的是信号 $Y_{mn}(t)$ 的基频分量, 而 $D_j Y_{mn}(t)$ 反映了红外焦平面阵列相对于景物的变化.

根据非均匀性校正理论, 选择合适的尺度 j 将

原信号分解, 从而得到逼近信号 $C_j Y_{mn}(t)$ 以及细节信号 $D_j Y_{mn}(t)$, 将逼近信号通过重构得到偏置估计

$$O_{mn}(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^j (C_k Y_{mn}(t) * \overline{H_{k-1}}) \quad (4)$$

由于平稳小波分解后, 其能量主要集中在低频部分, 所以对信号逼近部分进行重构其能量相差不大, 所以偏置部分的估计对小波分解的层次依赖性并不高.

而探测器的增益非均匀性在高频部分占有较大比例, 所以利用细节分量 $D_j Y_{mn}(t)$ 的二阶统计量经过归一化得到

$$G_{mn} = \left\{ \frac{\text{var}[D_j Y_{mn}(t)]}{\sum_m \sum_n \text{var}[D_j Y_{mn}(t)]} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

则最终校正结果为

$$X = (Y - O) / G \quad (6)$$

从而实现了红外焦平面阵列器件的非均匀性校正.

由于增益系数的估计对小波分解层次具有较大依赖性, 本文利用校正后非均匀性值的大小来选择合适的小波分解层次.

红外焦平面阵列各有效像元响应信号电压均方根偏差与阵列平均响应信号电压的百分比, 定义为红外焦平面阵列非均匀性值

$$U_R = (1/\bar{S}) \left\{ \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [S_{i,j}(\phi) - \bar{S}] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

式中, $S_{i,j}(\phi)$ 为第 (i, j) 个像元对辐照度 ϕ 的响应电压值; \bar{S} 为整个红外焦平面阵列中有效探测单元的平均响应电压值

$$\bar{S} = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{i,j}(\phi) \quad (8)$$

M, N 分别为焦平面阵列的探测单元的总行数和总列数; d, h 分别为焦平面阵列的死像元数和过热像元数. 其选择过程:

1) 将选择一个最大分解层数 K (本文为 8), 将序列图像进行时域平稳小波分解, 得到每一层的逼近分量以及细节分量.

2) 利用每一层的细节分量分别计算出对应的增益系数 O_1, O_2, \dots, O_K , 然后依次对逼近分量从低到高进行重构得到一系列偏置系数 G_1, G_2, \dots, G_K , 并利用式(6)进行校正.

3) 利用式(7)计算非均匀性值, 当用某一层校正系数进行校正后的非均匀性值与上一层校正后非均匀性值之差小于一个阈值 (本文为 0.8%), 即判定本层为合适非均匀性校正的小波分解层. 实际实验中发现分解到第三或者第四层即能得到最终的分解层数.

2 仿真试验

实验采用了长波红外探测器采集的 128 帧图

像,实验中采用序列的长度也是 128.

首先考察不同算法对非均匀性校正效果. 选择 DB4 小波对序列进行了 4 级分解,计算出非均运行校正的系数,然后对图像进行校正,如图 2.

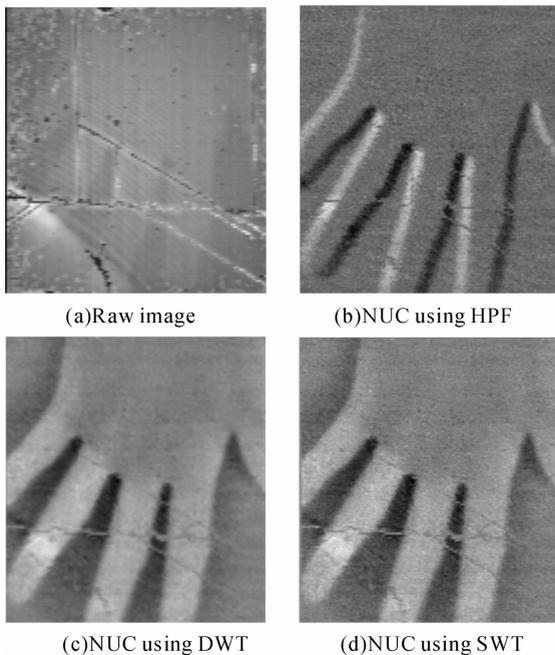


图 2 不同算法的校正效果

Fig. 2 NUC using different algorithms

表 1 不同算法校正的非均匀性

图像	非均匀性
原始图像	29.23%
高通滤波校正	9.48%
正交小波校正	5.31%
平稳小波校正	4.17%

图 2(a)是未经过非均匀性校正的原始图像,从图中可以看出,图像基本上被淹没在固定图案噪音中,信噪比很低;图 2(b)是经过时域高通滤波算法得到的校正效果,虽然图像质量有了很大质量的提高,但是校正效果仍不清晰,特别是存在明显的拖尾现象,即“人工鬼影”;图 2(c)是经过 3 层 DB4 正交小波的校正结果;图 2(d)是经过 3 层 DB4 平稳小波校正的结果,与(c)相比,图像质量明显有提高,而且图像的边缘也十分清晰.这是由于平稳小波变换后长度与原信号相同,能更好的提取图像的逼近以及细节信号.从图中可以看出由于小波的多分辨特性,能更好的提取图像序列中不同频率的信息,而平稳小波变换比正交小波变换更胜一筹.

然后考察不同小波函数对非均匀性校正的影响.对称性、正交性以及消失矩阶数是小波函数的重要性质,这些属性决定了小波函数的性质.选择正交 DB1、DB9 以及双正交 Bior2.4 小波函数进行校正,校正结果如图 3 和表 2.

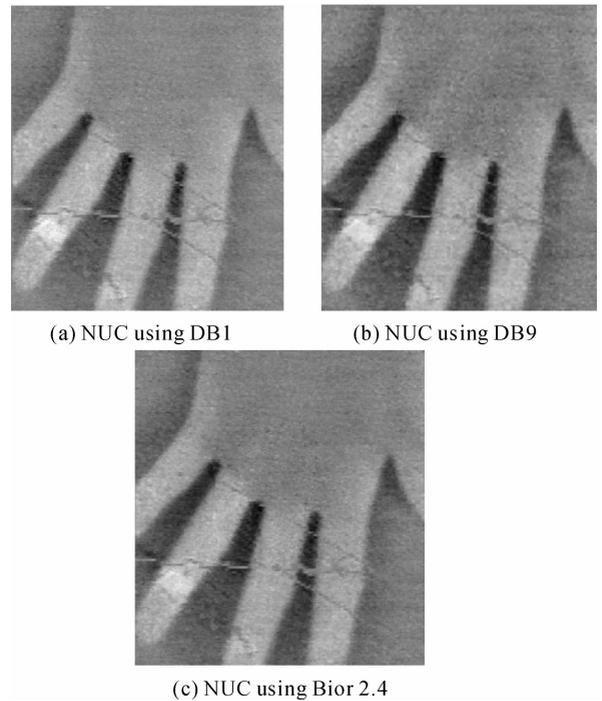


Fig. 3 不同小波函数的校正效果

表 2 不同小波函数的校正效果

图像	非均匀性
DB1	4.82%
DB9	4.53%
Bior2.4	4.28%

从实验结果上可以看出,不同小波函数对校正效果有一些略微的影响.结合表 1 和表 2 可以看出, DB4 小波是校正效果最好的,校正后非均匀性也是最小的;DB1 和 DB9 小波校正效果比 DB4 校正效果略差一些,这是由于小波函数的小波消失矩越高,其正则性越好,对平滑信号的描述能力越强,所以 DB4 小波校正比 DB1 校正效果好一些,但过高的消失矩不仅仅消除了目标噪音,也忽略了目标样本间距不细节的差异,反而影响了性能,故 DB9 小波校正效果略差于 DB4. Bior2.4 小波校正效果和 DB4 小波校正效果差别很小,小波函数的对称性在非均匀性校正应用中的影响并不大.

3 结论

根据信号以及固定图案噪音的不同频率分布,本文提出了一种利用平稳小波变换进行非均匀性校正的算法.利用小波的多分辨特性,将信号分解到不同的频率带中,从而估计出非均匀性线性模型的增益和偏置参量.此外,由于能精确的划分信号的不同频率带,所以能对探测器响应随时间缓慢变化有良好的自适应性,故能很好的抑制一般基于场景非均匀性校正算法中出现的“人工鬼影”现象.由于平稳小波比正交小波能对连续小波有更为近似的估计,

所以使用平稳小波变换来提取信号的各个频率成分能取得更好的效果. 通过对真实的红外场景进行实验,取得了良好的校正效果.

参考文献

- [1] HORMANS R, HEPFER K C, ZURASKY M. Uniformity compensation for high quantum efficiency focal arrays [C]. *SPIE*, 1996, **2744**: 154-164.
- [2] CAO Zhi-guo, SANG Nong. Digital implementation of nonuniformity correction for IRFPAs [C]. *SPIE*, 1999, **3698**: 807-814.
- [3] HARRIS J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant statistics constrain [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**(8): 1148-1151.
- [4] SCRIBNER D A, Sarkay K A, Krueeretal M R. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks [C]. *SPIE*, 1991, **1541**: 100-109.
- [5] HAYAT M M, TORRES S N, ARMSTRONG E E, *et al.* Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plan arrays [J]. *Appl. Opt.* 1999, **38**(8): 772-780.
- [6] TORRES S N, HAYAT M M, ARMSTRONG E E, *et al.* A Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays sensors [C]. *SPIE*, 2000, **4030**: 196-205.
- [7] ZHOU Huixin, LIU Shangqian, LAI Rui, *et al.* Solution for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. *Appl Opt.*, 2005, **44**(15): 2928-2932.
- [8] PEZOA J E, TORRES N. Mult-model adaptive Estimation for nonuniformity correction of infrared image Sequences [C]. *ICIAR 2004, Lecture Notes in Computer Science*, 2004, **3212**: 413-420.
- [9] LI Qing, LIU Shang-qian, LAI Rui, *et al.* A scene-based nonuniformity correction algorithm of IRFPA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 720-723.
李庆, 刘上乾, 赖睿. 一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 720-723.
- [10] ZHOU Hui-xin, QIN han-lin, *et al.* Scene-based nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays [C]. *Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics*, 2006: 169 - 169.
- [11] NASON G P SILVERMAN B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications [C]. *Lecture Notes in Statistics* 1995, **103**: 281-299.
- [12] SHENSA M J. The discrete wavelet transform: wedding the a trous and Mallat Algorithms [J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1992, **40**(10): 2464-2482.
- [13] FOSSUM E R, PAIN B. Infrared readout electronics for space science sensors: state of the art and future directions [C]. *SPIE*, 1993, **2020**: 262-282.
- [14] ZHANG Tian-xu, SHI Yan, *et al.* Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in IRFPA and the improvement of spatial adaptive nonuniformity correction technique [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2005, **24**(4): 255-260.

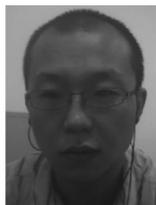
A New Correction Method of IRFPA Nonuniformity Based on Stationary Wavelet Transform

ZHANG Feng, LIU Shang-qian, WANG Da-bao

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Based on the analysis of fixed pattern noise on the basis of frequency distribution, a correction method using stationary wavelet was proposed. The infrared image sequence was decomposed by a proper wavelet function, thereby the gain and offset coefficients were estimated and eventually the infrared focal plane array nonuniformity correction was realized. The resolution of low-frequency part was improved by the virtue of the wavelet with its multi-resolution properties, so the “artificial ghost” phenomenon which appears in some scene-based NUC algorithm was restrained. Experiments on real infrared image sequence prove the superiority of the algorithm, and have achieved satisfactory results.

Key words: Imaging system; Infrared focal plane array; Nonuniformity correction; Stationary wavelet transform



ZHANG Feng was born in 1982. He is currently a Ph. D. degree candidate at School of Technical Physics, Xidian University. His main research interest is about infrared imaging system, infrared target detecting, tracking and recognition.