

基于维纳滤波的红外焦平面阵列非均匀性校正算法*

李 庆 刘上乾 王炳健 赖 睿

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘 要 充分利用红外图像的空间相关性和时间相关性,提出了一种基于维纳(Wiener)滤波的红外焦平面阵列(IRFPA)非均匀性校正算法,实现对辐射信号的无偏估计,滤波器的参量通过时域一、二阶统计结合空域平均获得,同现有的典型校正算法相比,本文算法具有收敛速度快、校正准确度高、理论分析以及针对实际红外图像的实验结果表明提出的算法更具优越性.

关键词 红外焦平面阵列;非均匀性校正;维纳滤波;空时域;相关性

中图分类号 TN215 **文献标识码** A

0 引言

在红外成像系统中,红外焦平面阵列(IRFPA)的应用日趋广泛.但是,IRFPA固有的非均匀性使得其成像图像中存在着较大的固有图案噪声(FPN),它严重地限制了红外成像系统的温度分辨率,因此,在IRFPA应用中几乎毫无例外地要进行非均匀性校正,更为麻烦的是FPN会随着时间缓慢变化,这就增添了非均匀性校正的难度.为了解决FPN缓慢变化的问题,传统的基于参考辐射源的非均匀性校正算法^[1,2],需要周期性地重复定标,这既影响到系统的正常工作又增加了系统的复杂度.作为一种替换,近些年来,国内外的一些学者开发出了基于场景的非均匀性校正算法,其中主要有:1)基于运动估计的校正算法^[3,4];2)基于单帧加“窗”滤波的校正算法^[5](中值或均值滤波算法,仅利用图像的空域信息),这类算法的典型代表是神经网络校正算法^[5](NN-NUC);3)基于统计的校正算法^[6,7](仅利用图像的时域信息),它的典型代表为恒定统计校正算法^[7](CS-NUC);等等.由于在大噪音和有干扰的情况下难以估计出运动量来^[3],实际中,基于运动估计的校正算法应用范围不如后两种算法广泛,特别是不如NN-NUC法和CS-NUC法应用广泛,但这两种算法的性能也很有限.本文(2)和(3)应与前面的表示相对应提出基于Wiener滤波校正算法,该算法充分地利用了图像的空时域信息,较NN-NUC法和CS-NUC法具有更好的校正性能.

1 非均匀性校正算法

1.1 探测元响应模型

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

$y_{ij}(n)$ 为第 ij 探测元 n 时刻的测量值; a_{ij} 、 b_{ij} 分别为第 ij 探测元的增益和偏置,由于IRFPA中各探测元的增益和偏置不同使得阵列具有非均匀性, a_{ij} 和 b_{ij} 具有随时间缓慢漂移的特点,但在算法运行期间假定为常量; $x_{ij}(n)$ 为第 ij 探测元 n 时刻的场景辐射信号,非均匀性校正的目标就是恢复辐射信号 $x_{ij}(n)$; $v_{ij}(n)$ 为第 ij 探测元 n 时刻的瞬时噪音,给定均匀背景温度 τ ,即 $x_{ij} = \tau$,则第 ij 探测元瞬时噪音方差定义为^[8]

$$\sigma_{v,ij}^2 = \frac{\sum_{t=1}^L [y_{ij}(t) - \mu_{y,ij}]^2}{L-1} \quad (2)$$

式中, $\mu_{y,ij} = \frac{\sum_{t=1}^L y_{ij}(t)}{L}$, L 为参与统计的图像序列的帧数,为了简便,下面叙述中省略下标 ij ,但是应该说明,下面的描述是针对阵列内任意固定探测元 ij 进行的.

1.2 初始工作阶段校正

设辐射信号 $x(n)$ 的线性估计 $\hat{x}(n)$ 表示为

$$\hat{x}(n) = w_1 y(n) + w_2 \quad (3)$$

从式(3)可看出,如果能够获得 w_1 和 w_2 的值或估计值,自然得到了辐射信号的估计值,从而完成了非均匀性校正, w_1 和 w_2 能通过满足最小均方误差准则求得,表示为

$$MSE(\hat{x}) = E[(\hat{x}(n) - x(n))^2] \quad (4)$$

经整理得Wiener滤波器的输出表示为

$$\hat{x}(n) = \frac{a\sigma_x^2}{\sigma_y^2} [y(n) - \mu_y] + \mu_x \quad (5)$$

式中, σ_x^2 和 σ_y^2 分别为辐射信号方差和测量值方差, μ_x 和 μ_y 分别为辐射信号均值和测量值均值,则辐射信号的估计从式(3)转化为式(5)的形式,辐射信号的估计也从求取 w_1 和 w_2 变成求取 a 、 σ_x^2 、 σ_y^2 、 μ_x 和 μ_y ,在 a 和 b 为常量情况下,由式(1)得到下面两个表达式

*国家自然科学基金(60377034)资助

Tel: 029-88202573 Email: lqing1001@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-12-14

$$\sigma_y^2 = a^2 \sigma_x^2 + \sigma_v^2 \quad (6)$$

$$\mu_y = a\mu_x + b \quad (7)$$

对于这些参量,可以利用统计的方法得到其估计值,假定有 k 帧的图像序列,则 μ_y 和 σ_y^2 的估计值 $\mu_y(k)$ 和 $\sigma_y^2(k)$ 用递归的形式给出,表示为

$$\mu_y(k) = \frac{k-1}{k} \mu_y(k-1) + \frac{1}{k} y(k) \quad (8)$$

$$\sigma_y^2(k) = \frac{k-1}{k} \sigma_y^2(k-1) + \frac{1}{k} [y(k) - \mu_y(k)]^2 \quad (9)$$

为了估计 μ_x 和 σ_x^2 ,考虑如下情况:对于相机来说,环境中的辐射信号 $x(n)$ 为 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 范围内的随机信号,辐射的均值 μ_x 和方差 σ_x^2 为确定的,各探测元随机地接受这一范围内的辐射信号,假定能够得到辐射信号 $x(n)$,这样,随着参加统计图像序列 k 的增加,统计均值 $\mu_x(k)$ 和统计方差 $\sigma_x^2(k)$ 会逐渐逼近 μ_x 和 σ_x^2 ,成为恒定常量(不会再随着 k 增长而变化),而由于非均匀性的存在使得探测元之间测量值的均值和方差不同,漂移的存在又使得单个探测元上测量值的均值和方差不恒定.假定 IRFPA 内增益的统计均值为 1,偏置的统计均值为 0^[4],此假设不会随着响应特性的漂移而改变^[6],如此,可以在阵列范围内分别对测量均值和测量方差求平均得到 μ_x 和 σ_x 的估计值.鉴于短期统计难于使整个阵列的探测元具有一致的 $\mu_x(k)$ 和 $\sigma_x^2(k)$,为了提高非均匀性校正速度,使用较少的图像序列,假定 IRFPA 局部区域的探测元具有一致的辐射信号均值 $\mu_x(k)$ 和方差 $\sigma_x^2(k)$,采用在 $2h+1$ “窗”内求平均,由式(6)和式(7)得到的辐射信号估计均值和估计标准差,表示为

$$\mu_x(k) = \bar{\mu}_y(k) = \frac{1}{(2h+1)^2} \sum_{p=i-h}^{i+h} \sum_{q=j-h}^{j+h} \mu_{y,pq}(k) \quad (10)$$

$$\sigma_x(k) = \frac{1}{(2h+1)^2} \sum_{p=i-h}^{i+h} \sum_{q=j-h}^{j+h} \sqrt{\sigma_{y,pq}^2(k) - \sigma_v^2} \quad (11)$$

由式(6)得到增益值,表示为

$$a = \frac{\sqrt{\sigma_y^2(k) - \sigma_v^2}}{\sigma_x(k)} \quad (12)$$

有了式(8)、(9)、(10)、(11)和(12),就能通过式(5)获得输入信号的估计值 $\hat{x}(n)$.

1.3 持续工作阶段校正

相机持续工作阶段,随着 k 的增大,各探测元的局部平均值 $\sigma_x(k)$ 和 $\mu_x(k)$ 会趋于一致,且最终收敛于全局平均,此时 $\sigma_x(k)$ 和 $\mu_x(k)$ 分别用 C_1 和 C_2 表示,漂移后的非均匀性信息包含在当前的测量值中,对测量均值和方差的估计要使用当前的 k_1 帧图像序列,应用式(8)、(9)求得,则 Wiener 滤波器有如下

的简化表示

$$\hat{x}(n) = \frac{C_1 \sqrt{\sigma_y^2(k_1) - \sigma_v^2}}{\sigma_y^2(k_1)} [y(n) - \mu_y(k_1)] + C_2 \quad (13)$$

本文算法为非递归算法,当每次由漂移产生新的非均匀性时,要更新 k_1 帧的图像序列,重新统计 $\mu_y(k_1)$ 和 $\sigma_y^2(k_1)$,而 C_1 和 C_2 不变,然后按照式(13)的形式重新构造 Wiener 滤波器,用以对接下来的序列图像进行滤波处理.

2 算法实验与分析

2.1 实验结果的评价指标

对算法性能评估采用 IRFPA 非均匀性国标定义指标 U ^[9]

$$U = \frac{1}{\bar{y}(x)} \sqrt{\frac{1}{pm} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m (y_{ij}(x) - \bar{y}(x))^2} \quad (14)$$

式中 $\bar{y}(x)$ 为 IRFPA 中所有探测元对输入信号 x 的平均响应值; $y_{ij}(x)$ 为第 ij 探测元对输入信号 x 的响应值, p 、 m 分别表示图像水平和垂直方向上的像素数.

2.2 实验结果与分析

实验中使用的是帧频为 25、像素为 320×240 的非制冷红外焦平面相机.首先求瞬时噪声方差 $\sigma_{v,ij}^2$,方法是:盖上相机镜头,采集 3000 帧均匀背景图像,根据式(2)计算求得;然后打开相机镜头,采集 3000 帧有场景变化的图像序列,用于对比实验.在空间局部平均和全局平均两种情况下做实验,局部平均分别使用 100 帧、200 帧图像序列,全局平均使用 3000 帧图像序列,窗的尺寸选为 13×13 ,则在图像序列为 200 帧时,由式(14)得到的校正结果如表 1.

表 1 非均匀性校正结果

	原始图像	Wiener 滤波	NN-NUC 法	CS-NUC 法
U	4.82%	0.51%	1.98%	2.89%

从图 1 的比较可以看出,在相同的情况下 Wiener 滤波算法[图(b)]要好于 NN-NUC 法[图(g)]和 CS-NUC 法[图(h)],表 1 也给出了相同的结论;图(d)为统计平均后的图像,可以看出,经过统计平均后,具体的目标和场景信息被模糊掉了,但非均匀性信息完好保存下来,此时局部区域内的探测元几乎具有一致的辐射信号统计均值,随着相机工作时间的增长,整个 IRFPA 内探测元上接受的辐射信号的一、二阶统计值会趋于一致,这时利用整个阵列辐射信号统计恒定的假设,同样能获得较好的校正效果.

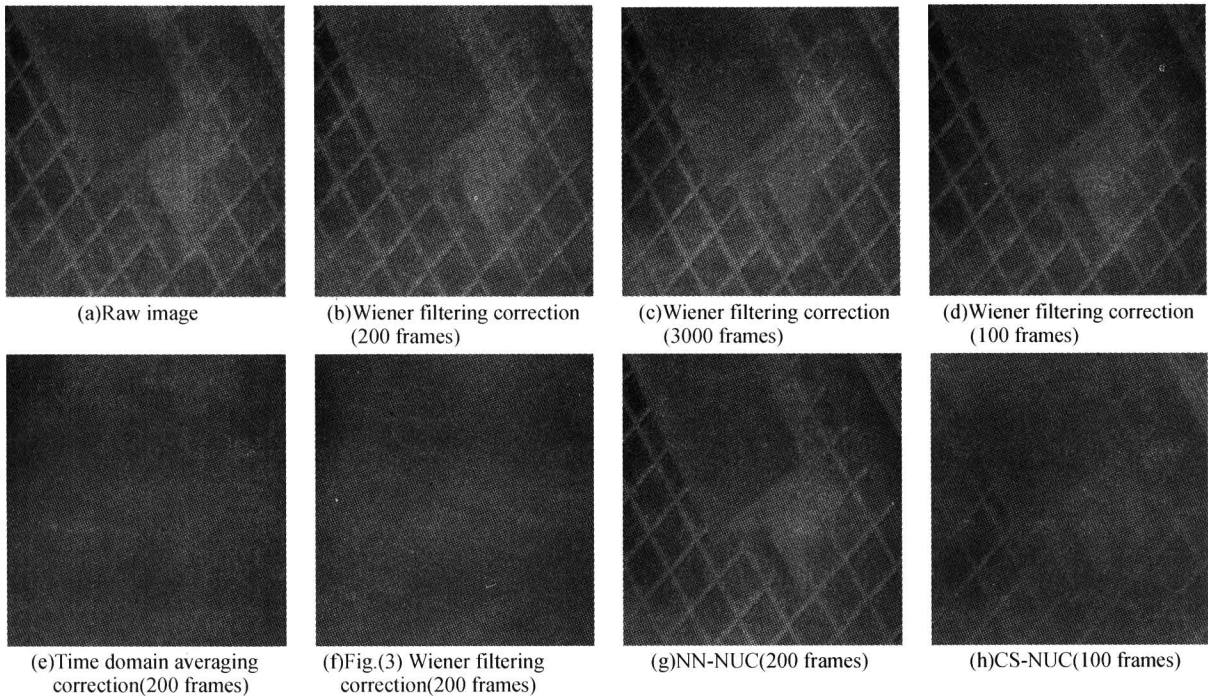


图1 算法处理结果

Fig. 1 Results after the algorithms

3 结论

充分地认识到 IRFPA 内相近邻的探测元接收到的辐射信号具有一致的统计均值和统计方差,以此为基础,利用图像序列的时间和空间信息,通过统计处理,提取辐射信号的统计信息和焦平面阵列的非均匀性信息,通过 Wiener 滤波器完成非均匀性校正. 算法的统计特点使其具有抗干扰能力和稳定性,统计值以递归的形式实现又使其占有较少的内存,加上其较少的计算量和快速的收敛性,使算法更适合应用在小型化的红外成像系统中,满足外场工程应用要求.

参考文献

- 1 殷世民,刘上乾. 基于低次插值的红外焦平面器件非均匀性多点校正算法. 光子学报,2002,**31**(6):715~718
Yin S M, Lin S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 715~718
- 2 付小宁,殷世民,刘上乾. 基于系统非线性的红外焦平面非均匀性校正. 光子学报,2002,**31**(10):1277~1280
Fu X N, Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10):1277~1280
- 3 拜丽萍,殷世民,刘上乾. 一种新的基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法. 光子学报,2004,**33**(1):109~

112

Bai L P, Yin S M, Liu S Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):109~112

- 4 Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E E, *et al.* Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registration. *Applied Optics*, 2000, **39**(8):1241~1250
- 5 Scribner D A, Sarkady K A, Kruer M R. Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks. *SPIE*, 1991, **1541**:100~109
- 6 Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays. *JOSA A*, 2003, **20**(3):470~480
- 7 Harris J, Chiang Y. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant statistics constraint. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, **8**(8):1148~1151
- 8 Schultz M, Caldwell L. Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane array. *SPIE*, 1995, **2470**:200~211
- 9 红外交平面阵列特性参量测试技术规范. 国标 GB/T17444~1998
The technique norms for measurement and test of characteristic of China. GB/T17444~1998

Wiener Based Nonuniformity Correction Algorithm for IRFPA

Li Qing, Liu Shangqian, Wang Bingjian, Lai Rui

School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

Received date: 2005-12-14

Abstract Using the space relativity and the time relativity of infrared image fully, a Wiener based nonuniformity correction algorithm for IRFPA was proposed. Then the unbiased estimation of radiation signal can be achieved. The filter's parameters were estimated by first- and second-order statistics in time-domain and average in space-domain. As compared with recent typical algorithm, this algorithm has faster rapidity of convergence and higher precision of correction. The theoretical analysis and the experiment with real infrared data show that the proposed algorithm has advantage over others.

Keywords IRFPA; Nonuniformity correction; Wiener filtering; Space-time domain; Relativity



Li Qing was born in 1972. He graduated from Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics with master's degree in 2002 and now studies for doctor's degree in Xidian University. He is interested in real-time infrared image processing.