

# 基于四阶累计量的固定噪音参量估计

徐田华<sup>1</sup> 马彩文<sup>2</sup> 赵亦工<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学模式识别与智能控制研究所, 西安 710071)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

**摘 要** 根据高斯噪音高于二阶的累积量为零的特性, 提出基于四阶累计量的红外焦平面固定噪音乘性参量估计算法, 完成从图象场景中自适应估计阵列单元的增益. 利用泰勒级数展开给出乘性参量估计均值和方差的统计特性, 证明算法给出乘性增益的估计为渐进无偏估计. 提出的算法用蒙特卡罗仿真给予验证, 证明了算法的有效性. 并将提出的算法应用于实际图象的处理, 有效降低了固定图案噪音, 达到了较高的非均匀校正水平.

**关键词** 四阶累计量; 红外焦平面阵列; 蒙特卡罗仿真; 固定图案噪音

**中图分类号** TN215      **文献标识码** A

## 0 引言

红外焦平面阵列在红外跟踪、预警、制导等方面得到了广泛的应用. 但由于制造工艺的限制, 使得探测器阵列的各个单元响应度不一致, 导致了叠加在图象上的固定图案噪音 (FPN-Fixed-Pattern Noise), 严重影响了成像质量.

Ratliff 等提出于基于图象配准的红外焦平面非均匀校正算法<sup>[1]</sup>, Torres 等提出了基于卡尔曼滤波的自适应非均匀校正算法<sup>[2]</sup>, Hayat 等利用恒定范围 (CR-Constant Range) 假设和矩估计技术提出红外焦平面非均匀校正的统计算法<sup>[3]</sup>. 目前, 国内学者也相继提出各种非均匀校正算法<sup>[4~6]</sup>.

本文根据高斯随机变量的高阶累积量 (大于 2 阶) 恒等于零的特性, 提出利用四阶累计量 (FOC-Four Order Cumulant) 进行红外焦平面非均匀噪音参量进行估计的算法, 简称 FOC-PE (FOC based Parameter Estimation) 算法. 算法不依赖于叠加在焦平面阵列上固定图案噪音的统计假设, 对于探测单元器件和读出电路产生的高斯噪音不敏感, 有效提高估计的准确度. 算法的性能分析证明, FOC-PE 算法得到的乘性噪音估计为渐进无偏估计, 使得算法的使用具备理论支撑.

## 1 原理简述

### 1.1 探测单元模型

本文采用探测单元的线性响应模型

$$Y_{ij}(n) = A_{ij}(n)X_{ij}(n) + B_{ij}(n) + N_{ij}(n) \quad (1)$$

式中  $Y_{ij}(n)$  为第  $n$  帧图象中处于  $(i, j)$  位置处的探

测单元响应;  $A_{ij}(n), B_{ij}(n)$  分别为第  $n$  帧图象中处于  $(i, j)$  位置处的增益参量和偏置参量;  $X_{ij}(n)$  为探测单元接收的辐射量;  $N_{ij}(n)$  为探测单元接收的时域随机噪音. 为方便起见, 以下将变量下标  $ij$  略去. 算法基于的 CR 假设如下: 1)  $N(n)$  为零均值的统计独立的高斯随机变量, 它与探测单元接收的辐射量  $X(n)$  是统计独立的; 2) 探测单元模型的增益和偏置与辐射量和噪音统计独立; 3) 探测单元接收到的辐射量在  $[x_{\min}, x_{\max}]$  范围内均匀分布, 这里  $x_{\min}, x_{\max}$  分别为探测单元接收的辐射量的最大和最小值.

### 1.2 乘性增益参量估计

设  $n_b$  为一组图象中图象帧数, 其值的选取依赖于模型参量漂移速度的快慢. 取第  $k$  组图象, 即图象位于区间  $kn_b - n_p \leq n \leq kn_b - 1, 1 \leq n_p \leq n_b$ . 根据 FPN 缓慢漂移的特性, 假定每组图象中, FPN 保持恒定. 根据式 (1), 求解探测单元响应数据  $Y(n)$  的均值, 方差和四阶累计量估计

$$\hat{y}(k) \triangleq \frac{1}{n_p} \sum_{n=kn_b-n_p}^{kn_b-1} Y(n) \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_Y^2(k) \triangleq \frac{1}{n_p} \sum_{n=kn_b-n_p}^{kn_b-1} [Y(n) - \hat{y}(k)]^2 \quad (3)$$

$$\hat{\kappa}_Y^{(4)}(k) \triangleq \frac{1}{n_p} \sum_{n=kn_b-n_p}^{kn_b-1} [(Y(n) - \hat{y}(k))]^4 - 3\hat{\sigma}_Y^4(k) \quad (4)$$

分别令其等于  $Y(n)$  的集平均, 集方差和四阶累计量, 同时令  $\kappa_X^{(4)}(k)$  表示区间  $kn_b - n_p \leq n \leq kn_b - 1$  内的辐射量的四阶累计量. 经过简单推导可得

$$\kappa_Y^{(4)}(k) \approx A_k^4 \kappa_X^{(4)}(k) \quad (5)$$

由 1.1 中的假设 3, 若检测单元接受的辐射量服从  $[x_{\min}(k), x_{\max}(k)]$  内的均匀分布, 则相应的四阶累计量估计为

$$\kappa_X^{(4)}(k) = -[x_{\max}(k) - x_{\min}(k)]^4 / 120 \quad (6)$$

联立式 (2) ~ (6), 得到对应的 FPN 乘性增益参量  $A_k$  估计.

\*国家自然科学基金(编号 69982008)资助项目  
Tel: 13991367507 Email: xth\_2002@sina.com  
收稿日期: 2005-01-31

### 算法性能分析

为方便起见,式(1)减去均值,得

$$y(n) = A_k x(n) + N(n) \tag{7}$$

式中  $y(n), x(n)$  的均值为零. 为公式推导方便, 设每组数据为  $N$  帧, 由式(2)~(5),  $A_k$  的估计式

$$\hat{A}_k = \left\{ \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y^4(i) + 3 \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y^2(i) \right]^2}{\kappa_x^{(4)}} \right\}^{1/4} \tag{8}$$

式(8)可以写成

$$\hat{A}_k = g(T_1, T_2) \tag{9}$$

式中

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y^4(i), T_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y^2(i),$$

$$g(T_1, T_2) = \left[ \frac{T_1 - 3T_2^2}{\kappa_x^{(4)}} \right] \tag{10}$$

在点  $T_1 = E(T_1) = \mu_1, T_2 = E(T_2) = \mu_2$  的一阶泰勒级数展开为

$$\hat{A}_k = g[\mu_1, \mu_2] + \frac{\partial g}{\partial T_1} \Big|_{T_1=\mu_1, T_2=\mu_2} (T_1 - \mu_1) + \frac{\partial g}{\partial T_2} \Big|_{T_1=\mu_1, T_2=\mu_2} (T_2 - \mu_2) \tag{11}$$

经推导, 可得  $A_k$  的均值为

$$E(\hat{A}_k) = g[\mu_1, \mu_2] = A_k \tag{12}$$

方差为

$$\begin{aligned} \text{var}(\hat{A}_k) &= \left[ \frac{\partial g}{\partial T_1} \Big|_{T_1=\mu_1, T_2=\mu_2} (T_1 - \mu_1) \right]^2 \text{var}(T_1) + \left[ \frac{\partial g}{\partial T_2} \Big|_{T_1=\mu_1, T_2=\mu_2} (T_2 - \mu_2) \right]^2 \text{var}(T_2) = \frac{1}{16A_k^8 (\kappa_x^{(4)})^2 N} \cdot \\ &\left[ \frac{A_k^8 (x_{\max} - x_{\min})^8}{3600} + \frac{119A_k^6 (x_{\max} - x_{\min})^6 \sigma_N^2}{840} + \frac{853A_k^4 (x_{\max} - x_{\min})^4 \sigma_N^4}{360} + 32A_k^2 (x_{\max} - x_{\min})^2 \sigma_N^6 + 96\sigma_N^8 \right] + \\ &\frac{9(A_k^2 \sigma_x^2 + \sigma_N^2)^2}{4A_k^6 (\kappa_x^{(4)})^2 N} \left[ \frac{A_k^4 (x_{\max} - x_{\min})^4}{180} + \frac{A_k^2 (x_{\max} - x_{\min})^2 \sigma_N^2}{3} + 2\sigma_N^4 \right] \end{aligned} \tag{13}$$

式中

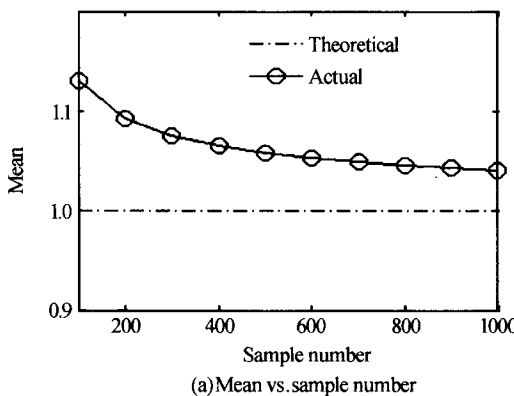
$$\sigma_x^2 = \frac{(x_{\max} - x_{\min})^2}{12} \tag{14}$$

由式可知, 增益参数  $A_k$  的估计渐进无偏, 并且方差随  $N$  的增大而减小, 从而为有效估计.

### 算法处理结果

#### 1. 乘性增益估计的统计特性分析

为评价增益参数  $A_k$  均值和方差的特性, 图 1



给出蒙特卡罗仿真试验, 试验参量如下,  $x_{\min} = 50, x_{\max} = 250, A_k = 1.0$ , 取样数据点从 100 到 1000. 图 1(a) 给出实际的仿真均值  $E(\hat{A}_k)$  和理论值  $A_k = 1.0$  的对比曲线, 由图可见, 估计随取样数据的增大而逐步减小, 近似无偏. 同样, 图 1(b) 给出理论方差曲线和仿真方差曲线, 试验方差和理论方差表现出与图 1(a) 同样的趋势, 即随取样数据的增大而迅速减小. 由此, 可以证明增益参数  $A_k$  的估计渐进无偏, 从而算法估计为有效估计.

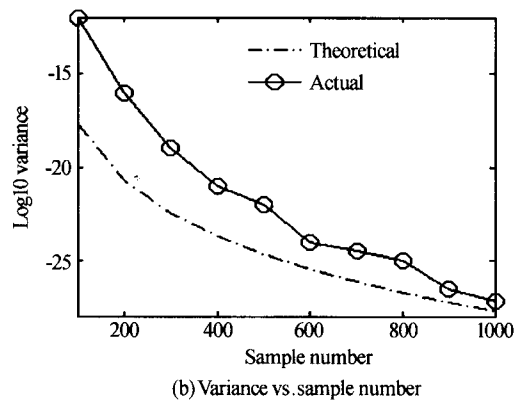


图 1 增益参数  $A_k$  性能  
Fig. 1 Performance of gain parameter  $A_k$

#### 2. HOS\_PA 算法应用于实际的红外图象

图 2 给出算法对实际图象的校正结果. 从主观视觉上, 噪音图象的非均匀性已校正到较高的水平.

表 1 给出校正前后光滑度指标  $\rho$  的数值, 其中

光滑度  $\rho$  的定义参见文献[2], 从中可以看出, HOS-PE 算法处理后, 光滑度指标降低了大约六倍. 从而证明了算法的有效性.

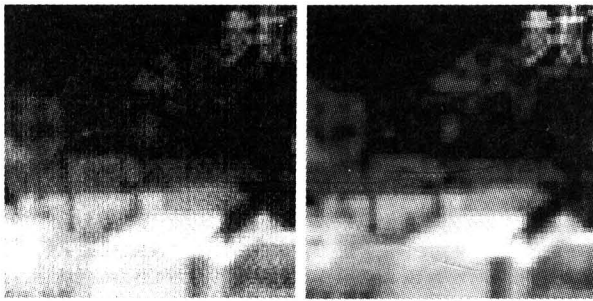


图 2 算法对实际数据的处理性能

Fig. 2 Performance of the HOS-PE method for real infrared data

表 1 算法对实际红外图象的校正性能参量  $\rho$

性能参量	校正前	校正后
$\rho$	0.8460	0.1767

## 4 结论

本文利用高阶统计量针对高斯噪音免疫的特性,给出红外焦平面非均匀乘性固定图案噪音参量的估计.通过一阶泰勒级数近似,给出估计量均值和方差的统计特性分析,证明估计的渐进无偏性.算法直接利用场景数据自适应估计参量,实现红外焦平面阵列乘性参量的盲估计,具有计算复杂度低,

易于工程实现等优点.

## 参考文献

- 1 Ratliff B M, Hayat M M, Tyo J S. Radiometrically accurate scene-based nonuniformity correction for array sensors. *J Opt Soc Am A*, 2003, **20**(10):1890~1899
- 2 Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays. *J Opt Soc Am A*, 2003, **20**(3):470~480
- 3 Hayat M M, Torres S N, Armstrong E E, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays. *Applied Optics*, 1999, **38**(8):772~780
- 4 周惠芯,殷世民,刘上乾,等.红外焦平面器件盲元检测及补偿算法. *光子学报*, 2004, **33**(5):598~600  
Zhou H X, Yin S M, Liu S Q, et al. *Acta Photomica Sinica*, 2004, **33**(5):598~600
- 5 李奇,冯华君,徐之海.自动对焦系统中图象非均匀采样的试验研究. *光子学报*, 2004, **32**(12):1499~1501  
Li Q, Feng H J, Xu Z H. *Acta Photomica Sinica*, 2004, **32**(12):1499~1501
- 6 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校正算法. *光子学报*, 2004, **33**(1):109~112  
Bai L P, Yin S M, Liu S Q. *Acta Photomica Sinica*, 2004, **33**(1):109~112

## Four-Order-Cumulant based Estimation of Fixed Pattern Noise for Gain

Xu Tianhua<sup>1</sup>, Ma Caiwen<sup>2</sup>, Zhao Yigong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Pattern Recognition and Intelligent Control, Xidian University, Xi'an 710071

<sup>2</sup> Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an, Chinese Academy of Science, Xi'an 710068

Received date: 2005-01-31

**Abstract** According to the property that for Gaussian signals only, all cumulant spectral of order greater than two are identically zero, a Four-Order-Cumulant based Parameter Estimation (HOS-PE) approach was undertaken for the adaptive estimation of the gain and bias nonuniformity in infrared focal-plane array sensors from scene data. The statistical property of mean and variance for the gain parameter was given by mean of Taylor expansion and the analysis proves the estimation was approximately unbiased. The proposed method has been tested by the Monte Carlo simulation and verified. At last, HOS-PE method was tested through video sequences of real infrared data, reducing the fixed pattern noise and reaching high correction levels.

**Keywords** Four-order-statistics; Focal-plane array; Monte carlo simulation; Fixed-pattern noise



**Xu Tianhua** was born in Shandong Province, in 1971. He received the B. S degree from Xi'an Jiaotong University, China in 1993, and the M. S degree from Shanghai Jiaotong University, China, in 2001. Now he is a Ph. D candidate for pattern recognition and intelligent control in Xidian University. His majors are image processing and signal processing.