

一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法*

李 庆 刘上乾 赖 睿 王炳健

(西安电子科技大学技术物理学院,西安 710071)

摘 要 针对 IRFPA 器件在工程使用中固定图案噪音会发生漂移及探测元响应呈现非线性的特征,提出了一种以二次方程表征的响应特性数学模型,并利用场景数据的卡尔曼滤波算法,对其实施双校正。本算法较基于线性模型的非均匀性校正算法具有更好的校正效果,仿真实验结果验证了算法的优越性。

关键词 红外焦平面阵列;非均匀校正;非线性响应;卡尔曼滤波;参量漂移

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中存在着较大的固有图案噪音,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。此外,IRFPA 中探测单元的响应特性会随时间的推移而产生缓慢的漂移,这就更增添了非均匀性校正的难度。

为了消除探测元响应特性漂移对非均匀性校正的影响,对于传统的基于参考辐射源的非均匀性校正算法^[1,2],则需要周期性地重复定标,这不仅影响系统的正常工作,还增加了系统的复杂度。为了克服这种局限性,自上世纪 90 年代以来,国内外的一些学者相继研究出了多种基于场景的非均匀性校正算法,这类算法可较好地消除探测元响应特性漂移对非均匀性校正的影响^[3~5]。但是这类算法都是基于探测元线性响应模型推导而出的,在 IRFPA 成像系统工作于大动态范围的情况下,其就难以适应了^[6]。例如在 IRFPA 成像制导系统中,当目标距离较远时,IRFPA 器件接受的信号较小,而当制导系统以高速接近目标时,IRFPA 器件所接受的信号将急剧增大,其动态范围达 100 dB 以上,这时红外器件响应的非线性就较为显著,此时若仍采用基于线性响应模型的非均匀性算法,其校正准确度将显著降低,以致残余较大的固有图案噪音^[7],使系统的性能大为下降。

针对 IRFPA 在成像制导等大动态范围中的应用,本文提出了一种基于二次非线性响应模型的卡尔曼滤波非均匀性校正算法,以降低 IRFPA 器件

响应非线性及漂移对非均匀性校正的不良影响,确保 IRFPA 成像系统在外场(实战)工程应用中的性能稳定。该算法的基本设计思路是:基于探测元的响应参量符合高斯-马尔可夫随机过程,采用一个二次非线性响应模型,建立状态方程和测量方程,而后利用正交原理推导出卡尔曼滤波器的递推公式,以估计出探测元响应参量,而实现非均匀性校正。该算法利用场景信息不断更新校正参量,从而可以不断补偿红外探测器响应特性的非线性和漂移对 IRFPA 非均匀性的不良影响。理论分析和仿真实验均表明,该校正算法动态范围大,校正准确度高,具有很好的外场工程适应能力。

1 非均匀校正算法模型

采用探测元的二次非线性响应模型^[8,9]

$$Y_k(n) = A_k + B_k \varphi_k(n) + C_k (\varphi_k(n))^2 + V_k(n) \quad (1)$$

式中, n 表示时刻(帧), $Y_k = [Y_k(1) \cdots Y_k(l_k)]^T$,表示第 k 个观察矢量,是一个长度为 l_k 的响应信号测量值序列; A_k 、 B_k 和 C_k 分别为第 k 个矢量时间内探测元的偏置、一次和二次响应系数, $\varphi_k(n)$ 为第 k 个观察矢量中的第 n 帧探测元上接收到的红外辐射, $V_k(n)$ 为第 k 个观察矢量中的第 n 个观察的读出噪音。根据实验统计,对参量 A_k 、 B_k 和 C_k 可作如下假定:1) 它们是 Gaussian 随机变量,且遵循 Gauss-Markov 过程;2) 它们彼此相互独立,且对不同探测元之间亦相互独立;3) 在单个观察矢量时间内是不变的,这个假定的观察矢量时间很短(例如几分钟),这也符合实际情况。此外,在第 k 个观察矢量中,假定 IRFPA 内探测元接收到的辐射在 $[\varphi_k^{\min}, \varphi_k^{\max}]$ 内是均匀分布的,且在不同探测元之间是相互独立的。式中 $C_k (\varphi_k(n))^2$ 表示非线性量,其定义为

$$\delta(\varphi) = \frac{C_k \varphi_k(n)}{B_k} \quad (2)$$

此参量表示了随着辐射变化探测元响应特性偏离线

* 国家自然科学基金(60377034)资助项目

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

收稿日期: 2005-07-15

性的程度. 根据式(2), 能够得到 C_k 的均值. 由于各探测元 C_k 值的不同, 使得 IRFPA 表现出非线性的非均匀性.

本文算法利用卡尔曼滤波器估计探测元的响应参量 A_k 、 B_k 和 C_k , 然后对其进行归一化处理, 达到非均匀性校正的目的. 使用卡尔曼滤波器需要两个数学模型, 即状态方程模型和观察方程模型. 将根据非均匀性校正过程的特点导出这两个模型.

1.1 状态模型

状态变量就是探测元的响应系数 A_k 、 B_k 和 C_k , 利用上面的假设, 可得下面的状态方程

$$X_{k+1} = \Phi_k X_k + G_k W_k \quad (3)$$

式中, $X_{k+1} = \begin{bmatrix} A_{k+1} \\ B_{k+1} \\ C_{k+1} \end{bmatrix}$; $\Phi_{k+1,k} = \begin{bmatrix} a_k & 0 & 0 \\ 0 & b_k & 0 \\ 0 & 0 & c_k \end{bmatrix}$; $X_k =$

$$\begin{bmatrix} A_k \\ B_k \\ C_k \end{bmatrix}; G_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; W_k = \begin{bmatrix} W_k^1 \\ W_k^2 \\ W_k^3 \end{bmatrix}.$$

X_{k+1} 和 X_k 分别是第 $k+1$ 和第 k 个矢量时间内的状态矩阵, Φ_k 称为状态转移矩阵, 参量 a_k 、 b_k 和 c_k 分别表示偏置、一次和二次响应系数的漂移. 统计表明, A_k 、 B_k 和 C_k 在时间上的随机漂移不会增加或减小非均匀性的统计特性, 也就是说, 状态的随机变化属于稳定的随机过程, 所以, 可以取 $a_0 = a_1 = \dots = a_k = a$, $b_0 = b_1 = \dots = b_k = b$, $c_0 = c_1 = \dots = c_k = c$. G_k 称为第 k 个矢量时间内的系统伴随矩阵; W_k 称为第 k 个矢量时间内的激励噪音矩阵, W_k^1 、 W_k^2 和 W_k^3 分别表示第 k 个矢量时间内的偏置、一次和二次响应系数的激励噪音. 第 k 个矢量时间内激励噪音的均值为

$$\bar{W}_k = E[W_k] = \begin{bmatrix} 1-a & 0 & 0 \\ 0 & 1-b & 0 \\ 0 & 0 & 1-c \end{bmatrix} \bar{X}_0 \quad (4)$$

其中, $\bar{X}_0 = E(X_0) = [\bar{A}_0, \bar{B}_0, \bar{C}_0]^T$. 第 k 个矢量时间内激励噪音的协方差矩阵为

$$Q_k = \begin{bmatrix} \sigma_{W_k^1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{W_k^2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{W_k^3}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\sigma_{W_k^1}^2$ 、 $\sigma_{W_k^2}^2$ 和 $\sigma_{W_k^3}^2$ 分别是偏置、一次和二次响应系数激励噪音的方差. 由式(3)可得

$$\begin{aligned} \sigma_{W_k^1}^2 &= (1-a^2)\sigma_{A_0}^2 \\ \sigma_{W_k^2}^2 &= (1-b^2)\sigma_{B_0}^2 \\ \sigma_{W_k^3}^2 &= (1-c^2)\sigma_{C_0}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

在此, $\sigma_{A_0}^2$ 、 $\sigma_{B_0}^2$ 和 $\sigma_{C_0}^2$ 分别为 $k=0$ 时的偏置、一次和二次响应系数的方差, 且假定初始条件 $\sigma_{A_0}^2$ 、 $\sigma_{B_0}^2$ 、 $\sigma_{C_0}^2$ 和 \bar{X}_0 均为已知量.

1.2 观察模型

采用了矢量化的观察模型为

$$Y_k = H_k X_k + V_k \quad (7)$$

式中 $Y_k = \begin{bmatrix} Y_k(1) \\ \vdots \\ Y_k(l_k) \end{bmatrix}$; $H_k = \begin{bmatrix} 1 & \varphi_k(1) & (\varphi_k(1))^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \varphi_k(l_k) & (\varphi_k(l_k))^2 \end{bmatrix}$;

$$X_k = \begin{bmatrix} A_k \\ B_k \\ C_k \end{bmatrix}; V_k = \begin{bmatrix} V_k(1) \\ \vdots \\ V_k(l_k) \end{bmatrix}, Y_k \text{ 是探测元第 } k \text{ 个观察}$$

矢量, H_k 和 V_k 分别是第 k 矢量时间内的测量矩阵和读出噪音矢量. 这里假定序列 $\{V(n)\}$ 是均值为零的高斯噪音, 且同输入辐射序列 $\{\varphi(n)\}$ 相互独立, 它的协方差矩阵为

$$R_k = I_{l_k} \sigma_{V_k}^2 \quad (8)$$

式中, I_{l_k} 是 $l_k \times l_k$ 的单位矩阵, $\sigma_{V_k}^2$ 是第 k 个矢量时间内的读出噪音方差, 具体表示为^[5]

$$\sigma_{V_k}^2 = \frac{1}{2} \frac{1}{l_k} \sum_{i=1}^{l_k} [D_k(i) - \bar{D}(k)]^2 \quad (9)$$

式中 $D_k(i) = Y_k(i) - Y_k(i-1)$, $\bar{D}(k) = \frac{1}{l_k} \sum_{i=1}^{l_k} D_k(i)$.

有了状态模型和观察模型, 就能进行卡尔曼滤波器设计, 用以估计探测元的响应系数.

2 卡尔曼滤波器

依据上述状态方程和测量方程, 利用正交原理, 可以推导出基于卡尔曼滤波的非均匀性校正算法的递推公式. 设卡尔曼滤波的初始状态为

$$\hat{X}_0 = EX_0 \quad (10)$$

初始误差协方差矩阵为

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{A_0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{B_0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{C_0}^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

当 $k \geq 1$ 时, 基于观察 $Y_1 \dots Y_k$ 的状态估计 \hat{X}_k 可以由下面的递推公式给出

$$X_{k|k-1} = \Phi_{k-1} \hat{X}_{k-1} + G_{k-1} \bar{W}_{k-1} \quad (12)$$

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + G_{k-1} Q_{k-1} G_{k-1}^T \quad (13)$$

$$P_k = (I_3 - K_k \bar{H}_k) P_{k|k-1} \quad (14)$$

$$K_k = P_{k|k-1} \bar{H}_k^T (\bar{H}_k P_{k|k-1} \bar{H}_k^T + R_k)^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Y_k - \bar{H}_k \hat{X}_{k|k-1}) \quad (16)$$

式中, I_3 是 3×3 单位矩阵, K_k 为卡尔曼增益矩阵, $P_{k|k-1}$ 为预测误差协方差矩阵, P_k 为误差协方差矩阵, $\hat{X}_{k|k-1}$ 为预测估计, \bar{H}_k 为观察矩阵在第 k 个观察矢量内的均值.

$$\bar{H}_k = \begin{bmatrix} 1 & E\varphi_k & E\varphi_k^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & E\varphi_k & E\varphi_k^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中 $E\varphi_k = \frac{1}{2}(\varphi_k^{\min} + \varphi_k^{\max})$, $E\varphi_k^2 = \sigma_\varphi^2 + (E\varphi_k)^2$, 而 $\sigma_\varphi^2 = \frac{1}{12}(\varphi_k^{\min} - \varphi_k^{\max})^2$.

3 算法仿真及结果分析

3.1 仿真结果的评价指标

对算法性能评估采用 IRFPA 非均匀性国标定义指标 $U^{[10]}$

$$U = \frac{1}{\bar{Y}(\varphi)} \sqrt{\frac{1}{pm} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m (Y_{ij}(\varphi) - \bar{Y}(\varphi))^2} \quad (18)$$

式中 $\bar{Y}(\varphi)$ 为 IRFPA 中所有像元对辐照度 φ 的平均响应值, $Y_{ij}(\varphi)$ 为第 (i, j) 像元对辐照度 φ 的响应值, p, m 分别表示图像水平和垂直方向上的像素数.

3.2 算法仿真

利用波长为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 范围内的 320×240 像素的非制冷红外焦平面相机按每秒 25 帧的速率采集 1000 帧图像数据, 由上述式(18)得到校正前器件

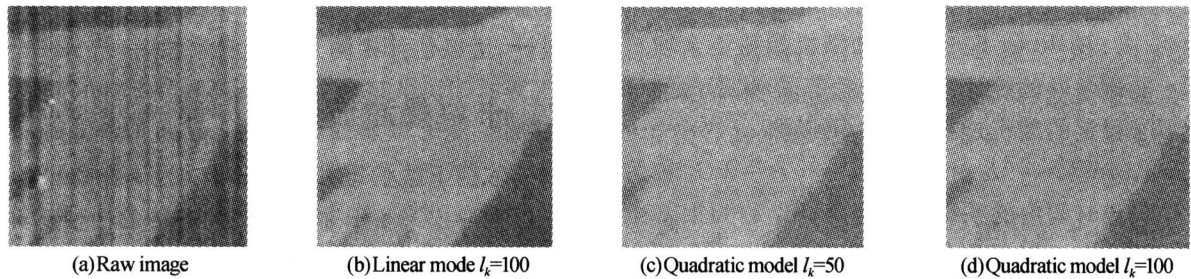


图 1 $k=2, a=b=c=0.9$ 情况下的校正结果
Fig. 1 Correction results while $k=2, a=b=c=0.9$

3.3 结果分析

从计算结果和校正后的图像都可以看出, 基于二次非线性模型的非均匀性校正效果优于基于线性模型的非均匀性校正效果. 在图 1(b) 中, 低温(环境温度)背景的灰度很均匀而高温目标上残留较多的剩余空间噪音, 这是由于线性模型与探测元实际响应曲线在目标温度点附近有较大的偏差, 即说明它拟合实际响应曲线的动态范围小. 在图 1(c)、图 1(d) 中, 整个图像都较平滑, 说明二次方程曲线更接近探测元的真实响应曲线, 能够在较大的范围内拟合实际响应曲线. 本算法作为一种基于场景的非均匀性校正算法仅适用于场景变化的情况. 另外, 从表 1、表 2 能够看出观察矢量的长度 l_k 对算法性能的影响较大, 如何自适应地选择合适的 l_k , 有待进一步研究.

的非均匀性为 $U=26.01\%$. 仿真中, 辐射等级范围为 $[0, 255]$, 对 IRFPA 内所有探测元给定相同初始值: $\bar{X}_0 = [0, 1, 0]^T$, $\sigma_{x_0}^2 = 0.25$, $\sigma_{y_0}^2 = 0.1$ 和 $\sigma_{z_0}^2 = 0.002$, 读出噪音方差由式(9)得出. 表 1 和表 2 给出了不同参量下的仿真结果.

表 1 不同的 k 和漂移参量下的校正结果

| k | $U(l_k=100)$ | |
|-----|--------------|-------------|
| | $a=b=c=0.9$ | $a=b=c=0.1$ |
| 1 | 2.24% | 2.26% |
| 2 | 1.02% | 1.04% |

表 2 不同的 k 和 l_k 下的校正结果

| k | $U(a=b=c=0.9)$ | |
|-----|----------------|----------|
| | $l_k=50$ | $l_k=80$ |
| 1 | 4.67% | 3.40% |
| 2 | 2.34% | 2.02% |

在 $k=2, a=b=c=0.9, l_k=100$ 情况下对线性模型进行了仿真, 校正后得到器件非均匀性为 $U=4.82\%$. 图 1 给出了一组校正前后的图像, 图 1(b) 是线性模型的校正效果图, 图 1(d) 是相同条件下二次非线性模型的校正效果图.

4 结论

IRFPA 非线性及响应特性漂移是目前 IRFPA 非均匀性校正技术中面临的一个难题. 目前一般基于场景的非均匀性校正算法虽能在一定程度上消除响应特性漂移的影响, 但它们都是基于响应特性的线性模型, 当 IRFPA 器件工作在较大的动态范围时, 响应的非线性引起的非均匀性会变得较为突出. 本文建立了二次非线性响应模型, 而后利用卡尔曼滤波的方法递归地估计出探测元的响应参量, 从而实现非均匀性校正. 研究表明, 该方法不仅能较好地补偿响应特性漂移引起的校正误差, 而且能在大动态范围内抑制非线性的不良影响, 从而可在大动态范围获得较高的校正准确度.

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 Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal plane arrays. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, **20**(3): 470~480
- 5 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
- 6 Mooney J M, Shepherd F D, Ewing W S, *et al.* Responsivity nonuniformity limited performance of infrared staring cameras. *Opt Eng*, 1989, **28**(11): 1151~1161
- 7 Perry D L, Dereniak E L. Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors. *Opt Eng*, 1993, **32**(8): 1854~1859
- 8 Kozlowski L J, Bailey R B, Cabelli S A, *et al.* High-performance 5 μm 640 \times 480 HgCdTe-on-sapphire focal plane arrays. *Opt Eng*, 1994, **33**(1): 54~63
- 9 Eismann M T, Schwartz C R. Focal plane array nonlinearity and nonuniformity impacts to target detection with thermal infrared imaging spectrometers. *SPIE*, 1997, **3063**: 164~173
- 10 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

A Scene-based Nonuniformity Correction Algorithm of IRFPA

Li Qing, Liu Shangqian, Lai Rui, Wang Bingjian

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

Received date: 2005-07-15

Abstract Aiming at the fixed-pattern noise drift and the nonlinearity photoresponse characteristic of every detector in IRFPA in engineering using, a quadratic response characteristic mathematics model and a Kalman filtering algorithm using sense data are proposed. Double correction is performed to it. The algorithm proposed is more perfect than the algorithm for nonuniformity correction using linear model. The simulation result shows the superiority of the algorithm.

Keywords Infrared focal plane array; Scene-based nonuniformity correction; Nonlinear response; Kalman filtering; Parameter drift



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