

文章编号: 1001 - 9014 (2009) 06 - 0436 - 04

递推混合最小二乘在红外焦平面 阵列非均匀校正中的应用

刘永进, 朱红, 赵亦工

(西安电子科技大学 模式识别与智能控制研究所, 陕西 西安 710071)

摘要: 基于递推最小二乘 (RLS) 的红外焦平面阵列非均匀校正算法具有计算量和存储量小等优点, 易于工程实现。但 RLS 并不完全满足实际问题模型的要求, 因此拟合出的噪声参数存在严重偏差。提出了一种利用递推混合最小二乘 (RMLS) 替代 RLS 进行非均匀校正的算法, 它不但具有原方法的各种优点, 而且由于符合问题模型的基本特征, 因此在拟合精度和收敛速度方面都优于 RLS。文中实验结果也验证了该方法的有效性。

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀校正; 固定图案噪声; 递推最小二乘; 递推混合最小二乘
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

APPLICATION OF RECURSIVE MIXED LEAST SQUARES TO NONUNIFORMITY CORRECTION IN INFRARED FOCAL PLANE ARRAYS

LIU Yong-Jin, ZHU Hong, ZHAO Yi-Gong

(Institute of Pattern Recognition and Intelligent Control, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The advantage of nonuniformity correction algorithm based on recursive least squares (RLS) in RFPA lies in its low computational complexity and memory requirements, which makes it easy to meet the need of projects. However, RLS is not suitable for the real algorithmic model completely since the noise parameter fitted in RLS exists severe deviations. Thus, a novel nonuniformity correction algorithm based on recursive mixed least squares (RMLS) was developed. In this new algorithm, RLS was substituted by RMLS for nonuniformity correction. This proposed algorithm not only has all the advantages of RLS, but also gets more excellent results in estimation precision and convergent speed. The experimental results also demonstrate the effectiveness of the algorithm.

Key words: infrared focal plane arrays (RFPA); nonuniformity correction; fixed-pattern noise; recursive least squares; recursive mixed least squares

引言

由凝视型红外焦平面阵列 (Infrared Focal Plane Array, RFPA) 构成的成像系统不需要传统的光机扫描, 具有体积小、灵敏度高、性能稳定等优点, 是目前发展的主要方向。但由于制造工艺水平的限制, 使得焦平面阵列上各探测单元对于同一辐照的光电响应不完全一致, 即产生固定图案噪声 (Fixed-Pattern Noise, FPN), 它严重影响了红外系统的成像质量。因此, 在实际应用中, 必须要先对其进行非均匀校正 (Nonuniformity Correction, NUC)。

目前, RFPA 的非均匀校正技术主要可以分为两大类: 一类是基于标定的方法^[1], 这类方法具有较高的校正精度, 但需要许多辅助器件 (如: 黑体源、光学设备等), 因此大大增加了探测器的体积和成本, 并且在标定过程中成像系统还必须暂停工作, 这严重制约了该类算法的使用范围; 另一类是基于场景的方法^[2~7], 它直接利用每帧图像的场景信息进行非均匀校正, 克服了第一类方法的不足, 但这类技术往往具有较大的计算量和存储量, 因此很难实时处理。

本文在参考文献 [3] 的基础上提出了基于递推混合最小二乘 (Recursive Mixed Least Squares,

RMLS)的 RFPA 非均匀校正算法. 该方法是以逐帧迭代的方式校正图像,不但具有递推最小二乘 (Recursive Least Squares, RLS)^[3]算法的各种优点,而且拟合精度和收敛速度都比 RLS方法要高.

1 算法模型

对于一个大小为 $M \times N$ 的红外焦平面阵列,其上各探测器的输出响应曲线一般互不相同,但都可以近似利用线性模型来描述:

$$y_k(i, j) = a_k(i, j)x_k(i, j) + b_k(i, j) + v_k(i, j), \quad (1)$$

其中, $x_k(i, j)$ 表示第 k 帧时坐标为 (i, j) 的探测器所接收到的真实红外辐照; $a_k(i, j)$ 和 $b_k(i, j)$ 分别表示此时该探测器的乘性噪声参数和加性噪声参数; $v_k(i, j)$ 表示随机产生的电子噪声.

由于本算法是对每个像素点分别进行处理的,所以为了方便表达,略去探测器坐标 (i, j) , 则式 (1) 可以简化为:

$$y_k = a_k x_k + b_k + v_k. \quad (2)$$

2 算法描述

红外焦平面阵列非均匀校正正是典型的盲估计问题,因为真实场景和噪声参数都无法得到. 为使问题可解,有一种办法是预先估计出场景的真实值,如文献 [3] 就是利用探测器输出图像的邻域平均来估计真实场景;又如 Hardie 等提出的基于运动补偿时域平均 (Motion-Compensated Temporal Average, MCTA)^[5] 的算法,该算法认为在移动焦平面阵列拍摄静态场景时,其上不同探测单元有可能接收到同一场景点的红外辐照,而邻近图像之间是可以近似通过相互平移得到的 (具体方法有:相位配准^[4]、梯度配准^[5]等). 这样,把不同探测单元对同一红外辐照的响应做平均,其结果即可用来作为该真实辐照的估计值. 本文采用的是后者,因为它不仅能够很好地保持图像边缘,并且还可以在一定程度上降低随机电子噪声的干扰.

2.1 递推最小二乘算法

假设真实红外辐照 x_k 的估计值为 \hat{x}_k , \hat{a}_k 和 \hat{b}_k 分别为乘性和加性噪声参数的估计值,则 y_k 的估计误差为:

$$y_k = y_k - \hat{a}_k \hat{x}_k - \hat{b}_k, \quad (3)$$

现令 $\hat{k} = [\hat{a}_k \quad \hat{b}_k]^T$, $H_k = [\hat{x}_k \quad 1]$, 则式 (3) 可以改写为:

$$y_k = y_k - \hat{y}_k = y_k - H_k \hat{k}. \quad (4)$$

对于第 k 帧输出图像, \hat{k} 的取值必须使下式最

小,即:

$$J_k = \sum_{n=1}^k (y_n - H_n \hat{k})^2. \quad (5)$$

将上式对 \hat{k} 进行求导,并令结果为零,得:

$$\begin{aligned} \hat{k} &= [H^T(k)H(k)]^{-1}H^T(k)y(k) \\ &= P_k H^T(k)y(k), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $y(k) = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_k]^T$, $H(k) = [H_1^T \quad H_2^T \quad \dots \quad H_k^T]$, P_k 为协方差矩阵.

式 (6) 虽然能够估计出噪声参数 \hat{k} , 但随着帧数 k 的增加,会带来巨大的计算量和存储量. 为了能够递推更新噪声参数,可以采用 RLS 算法,所有必要的表达式如下:

$$\hat{k}_{k+1} = \hat{k}_k + K_{k+1} [y_{k+1} - H_{k+1} \hat{k}_k], \quad (7)$$

$$K_{k+1} = P_{k+1} H_{k+1}^T, \quad (8)$$

$$P_{k+1} = P_k - \frac{P_k H_{k+1}^T H_{k+1} P_k}{1 + H_{k+1} P_k H_{k+1}^T}. \quad (9)$$

需要指出的是,式 (7) ~ (9) 的每一次循环都伴随着红外图像的更新,并且在开始迭代时, \hat{k}_0 和 P_0 需要被赋予初值,而不是通过式 (6) 计算.

通过对 RLS 进一步研究可以发现,该方法实际上假设 \hat{x}_k 是无误差的^[8],而误差 y_k 只存在于对 y_k 的估计中,如式 (3) 所示. 但我们知道 \hat{x}_k 是真实场景 x_k 的估计值,必然存在偏差. 因此这个假设并不成立,RLS 拟合出的噪声参数也并非最优.

2.2 递推混合最小二乘算法

完全最小二乘 (Total Least Squares, TLS) 算法可以用于 $H(k)$ 和 $y(k)$ 同时存在误差的情形,但 TLS 需要假设 $H(k)$ 和 $y(k)$ 各列有均匀的误差分布. 事实上, $H(k)$ 的第二列恒为 1,并不存在误差,而误差只存在于第一列,因此与 TLS 的前提假设不相符. 这里,我们采用了一种所谓的混合最小二乘 (MLS) 算法^[8],它不但很好地综合了上述两种方法,而且完全符合本模型的要求,即能够解决只有 \hat{x}_k 和 $y(k)$ 同时存在误差时的线性拟合问题.

在描述 MLS 算法之前,我们先对“ $\cdot(k)$ ”形式作一个约定, $\cdot(k)$ 即表示由 $\cdot_1, \cdot_2, \dots, \cdot_k$ 构成的列向量,如 $\hat{x}(k) = [\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2 \quad \dots \quad \hat{x}_k]^T$.

由于 MLS 只有部分满足 TLS 条件,由参考文献 [9] 可知,该算法等价于在 Frobenius 意义下最小化 $\hat{x}(k)$ 和 $y(k)$ 的误差 $x(k)$ 和 $y(k)$:

$$\begin{cases} \min [x(k) \quad y(k)]_F \\ \text{subject to} \\ [W(k) + V(k)]_k = [1 \quad y(k) \quad -y(k) \quad \hat{x}(k) + x(k)]_k = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

这里, $x_k = [b_k \quad -1 \quad a_k]^T$, $W(k)$ 被例化为

$$W(k) = [1 \quad y(k) \quad \hat{x}(k)]^T, \quad (11)$$

其中, $W(k)$ 的第 1 列恒为 1,并不存在任何误差.

考虑到 $W(k)$ 可以被 QR 分解成一个酉矩阵和一个上三角矩阵的乘积:

$$W(k) = Q(k) \bar{R}(k), \quad (12)$$

其中, $Q(k)$ 是一个 $k \times k$ 的酉矩阵, $\bar{R}(k)$ 是一个 $k \times 3$ 的高阵 (Tall Matrix),除了前三行是一个上三角矩阵以外,其余各行均为零.现用 $R(k)$ 表示 $\bar{R}(k)$ 的前三行,则对于一组新的 W_{k+1} , $R(k+1)$ 可以通过 $R(k)$ 得到,即:

$$\begin{bmatrix} R(k+1) \\ 0 \end{bmatrix} = T(k+1) \begin{bmatrix} R(k) \\ W_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中, $T(k+1)$ 表示一系列 Givens 旋转的总和,是一个酉矩阵,它总可以把式 (13)中矩阵的第四行变成全零.

现将 3×3 的上三角矩阵 $R(k)$ 表示如下:

$$R(k) = \begin{bmatrix} R_{11}(k) & R_{1y}(k) & R_{12}(k) \\ 0 & R_{2y}(k) & R_{22}(k) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中, $R(k)$ 的第 2 行均为 2×1 的向量.

由于 $W(k)$ 和 $R(k)$ 在均方意义下是等价的,所以 $R(k)$ 的第 1 列也不存在误差,而所有误差都集中在第 2、3 两列.这样,对于求解方程:

$$R(k) \hat{x}_k = \begin{bmatrix} R_{11}(k) & R_{1y}(k) & R_{12}(k) \\ 0 & R_{2y}(k) & R_{22}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b}_k \\ -1 \\ \hat{a}_k \end{bmatrix} = 0, \quad (15)$$

可以分成两步.首先从方程:

$$R_2(k) \begin{bmatrix} -1 \\ \hat{a}_k \end{bmatrix} = [R_{2y}(k) \quad R_{22}(k)] \begin{bmatrix} -1 \\ \hat{a}_k \end{bmatrix} = 0, \quad (16)$$

中解出 \hat{a}_k 值;然后再从下式中解出 \hat{b}_k 值,

$$R_{11}(k) \hat{b}_k - R_{1y}(k) + R_{12}(k) \hat{a}_k = 0. \quad (17)$$

观察 2×2 的矩阵 $R_2(k)$ 可以发现,它的两列都存在误差,满足 TLS 的条件,因此对于式 (16)可以通过递推算法求出 \hat{a}_k 值,然后再利用式 (17)解出 \hat{b}_k 值.

综上所述,对于本问题的递推混合最小二乘算法的步骤可以归结如下:

步骤 1:初始化 $R(0) = I, \hat{a}_0 = 1$.

步骤 2:对于一幅新的图像,有 $W_{k+1} = [1 \quad y_{k+1}$

$\hat{x}_{k+1}]^T$,利用式 (13)计算 $R(k+1)$.

步骤 3:令 $x_{k+1} = [-1 \quad \hat{a}_k]^T$,计算 $R_2^T(k+1)R_2$

$(k+1) = x_{k+1}$ 中的.

步骤 4: $\hat{a}_{k+1} = -R_{2y}(k+1) / R_{22}(k+1)$.

步骤 5: $\hat{b}_{k+1} = (R_{1y}(k+1) - R_{12}(k+1) \hat{a}_{k+1}) / R_{11}(k+1)$, $k = k+1$,转步骤 2

其中, I 为 3×3 的单位矩阵, $I = [\quad \quad \quad]^T$.

2.3 非均匀校正

由 2.2 节可知,我们能够利用第 k 帧图像来更新焦平面阵列上各探测单元的乘性噪声参数 \hat{a}_k 和加性噪声参数 \hat{b}_k ,则此时的校正结果可以通过下式近似得出:

$$\tilde{x}_k = \frac{y_k - \hat{b}_k}{\hat{a}_k}. \quad (18)$$

随着迭代帧数 k 的增加,估计出的噪声参数会渐渐收敛于真实值,而经过校正后的图像也会越来越逼近真实场景.

3 算法仿真与结果分析

3.1 算法的拟合能力

由第二部分可知, RMLS 比 RLS 更加适合解决

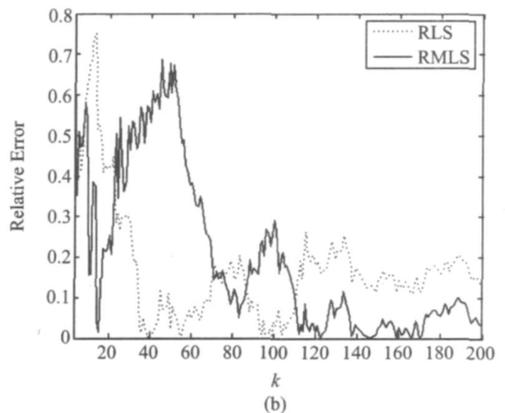
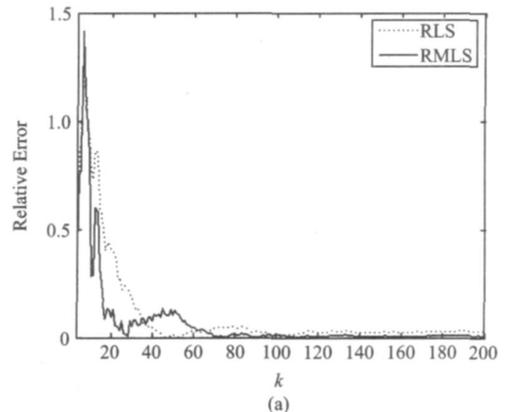


图 1 两种方法的拟合效果 (a) a 估计值的相对误差 (b) b 估计值的相对误差

Fig 1 Fitting results of the two methods (a) Relative error of estimated value of a (b) Relative error of estimated value of b

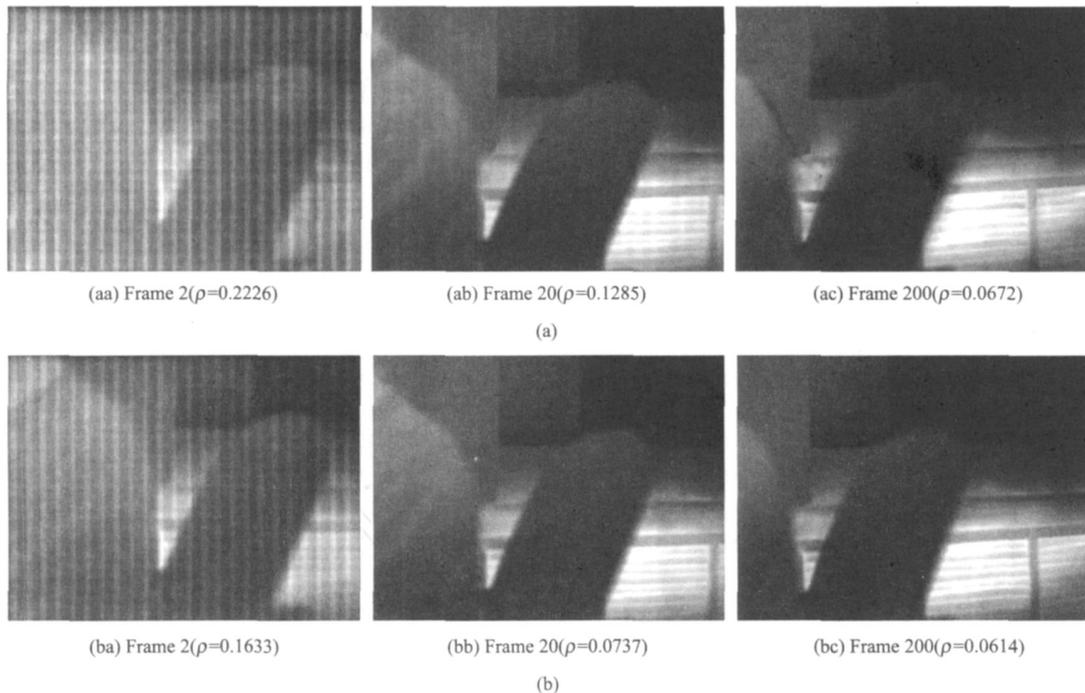


图 2 两种算法的递推校正效果 (a) RLS方法校正 (b) RMLS方法校正

Fig 2 Recursive correction results of the two algorithms (a) corrected by RLS (b) corrected by RMLS

输入和输出同时存在误差的估计问题. 为了证明这一点,我们先随机产生一个 200 数值的序列 x , 然后给定 a 和 b 的值, 按照式 (2) 计算出 y , 再在 x 和 y 上分别加一个均值为 0, 标准差为 10 的随机噪声, 则图 1 显示了用上述两种方法拟合后的结果与真实值之间的关系.

如图 1(a) 所示, 当 k 小于 60 时, RMLS 和 RLS 的预测结果都很不稳定, 并且与 a 值相差较大, 但当 k 大于 60 以后, 这两种方法都渐渐收敛到一个稳定状态, 很明显此时 RMLS 的拟合精度比 RLS 要高. 图 1(b) 同样也可以说明这一点, 只不过当 k 大于 110 以后两种方法的拟合结果才开始稳定, 这主要与随机序列 x 的数值特征有关.

3.2 算法的非均匀校正能力

本节我们将使用 200 帧、大小为 320×240 的真实红外图像序列来检验算法的实际校正水平, 并用粗糙度^[6] (Roughness) 作为评价指标, 值越小表示性能越好.

如图 2 给出了 RLS 和 RMLS 在不同时刻的校正效果, 由图可以看出, RMLS 明显优于 RLS, 值也较小. 特别是对第 200 帧的校正结果, 如图 2 (ac) 和 (bc) 所示, 这两种方法都已完全去除了原图像中的固定图案噪声, 但图 (ac) 的轮廓比较模糊, 即伪像 (Ghosting Artifact) 显然要比图 2 (bc) 严重, 其主要

原因在于用 RLS 拟合出的噪声参数存在一定偏差, 特别是当前后两帧图像差别不大时这种偏差更为严重, 另外由于算法是递推进行, 故而驻留在噪声参数里的误差很难在短时间内消除, 加之又会有新的噪声偏差出现, 表现在图像上即为时不变的伪像; 而 RMLS 由于很好地满足算法模型要求, 大大提高了噪声参数的拟合精度, 因此可以有效地抑制伪像的生成.

另外, 我们还使用 PC 机 (CPU 为 Celeron 2.0GHz, 内存大小为 768MB) 在 Matlab 环境下仿真 RLS 和 RMLS 方法, 平均校正一帧图像分别需要 9.7245 和 10.1583 s. 又由于这两者都是以递推形式校正图像, 因此所需存储量也很接近, 完全可以满足实时处理的要求.

4 结论

本文提出了一种基于 RMLS 的红外焦平面阵列非均匀校正算法, 它与 RLS 一样也是以逐帧迭代的方式进行校正, 故而计算量和存储量都很小, 易于实时处理. 但 RMLS 方法更加适合本问题模型的特点, 因此在拟合精度和收敛速度等方面都要优于 RLS 方法, 从而能够校正出质量更高的图像, 实验结果也表明了这一点.

(下转 471 页)

算法可以精确定位真实变化信息的位置,且漏检测目标数只有 199,远远小于其他两种方法.由图 8(b)可知,当窗口大小为 3×3 时,检测结果最优.

3 结论

本文提出了一种基于两时相图像联合分类的 SAR 图像变化检测方法,用 K 均值构造联合分类器,并且由相似度阈值控制联合分类结果的精度,最后通过比较分类结果获得变化检测影像.与 K-means-PCC 和 ISODATA-PCC 检测法相比,本文方法不但可提高单幅图像的分类精度,而且能把同一地物信息在不同时相的图像划分为相同的类别信息,减少了由于独立分类所引起的分类累积误差的影响,从而有效地降低变化检测的误检数和漏检数,并能确定变化信息的类型,与客观的变化信息比较相近.

今后的工作将采用基于纹理特征的联合分类,进一步改善分类精度,提高变化检测性能.

REFERENCES

- [1] Singh A. Digital change detection techniques using remotely sensed data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, **10**(6): 989—1003.
- [2] Radke R J, Andra S, Al-Kofahi O, et al. Image change detection algorithms: a systematic survey[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(3): 294—307.
- [3] Fransson J E S, Walter F, Blennow K, et al. Detection of storm-damaged forested areas using airborne CARABAS-II VHF SAR image data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(10): 2170—2175.
- [4] Mas J F. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**(1): 139—152.
- [5] Ridd M K, Liu J J. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment[J]. *Remote Sensing Environment*, 1998, **63**(2): 95—100.
- [6] Lu D, Mausel P, Brondizio E, et al. Change detection techniques[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, **25**(12): 2365—2407.
- [7] LI De-Ren. Change detection from remote sensing images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (李德仁.利用遥感影像进行变化检测.武汉大学学报(信息科学版)), 2003, **28**(3): 7—12.
- [8] Haboudane D, Bahri E M. Deforestation detection and monitoring in cedar forest of the Moroccan Middle-Atlas mountains[C]. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Jul 2007, 23-28, 4327—4330.
- [9] MA Xiu-Li, JIAO Li-Cheng. SAR image segmentation based on watershed and spectral clustering[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马秀丽,焦李成.基于分水岭谱聚类的 SAR 图像分割.红外与毫米波学报), 2008, **27**(6): 452—456.
- [10] Sezgin M, Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 146—165.
- [11] Lee J. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images[J]. *Optical Engineering*, 1986, **25**(6): 636—643.
- [12] Inglada J, Mercier G. A new statistical similarity measure for change detection in multitemporal SAR images and its extension to multiscale change analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(5): 1432—1445.

(上接 439页)

REFERENCES

- [1] LENG Han-Bing, TANG Xin-Yi, PENG Ding-Xiang. Research on nonuniformity correction of RFPA based on integral time adjust[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (冷寒冰,汤心溢,彭鼎祥.基于积分时间调整的红外焦平面阵列非均匀校正算法研究.红外与毫米波学报), 2007, **26**(4): 246—250.
- [2] Pezoa J E, Hayat M M. Multimodel Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared sensors[J]. *J. Opt Soc Am. A*, 2006, **23**(6): 1282—1291.
- [3] Torres F, Torres S N, Martin C S. A recursive least square adaptive filter for nonuniformity correction of infrared image sequences[J]. *LNCs*, 2005, **3773**: 540—546.
- [4] XU Tian-Hua, ZHAO Yi-Gong. Iterative least square-based algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays[J]. *Acta Photonica Sinica* (徐田华,赵亦工.基于递推最小二乘的红外焦平面非均匀校正算法.光子学报), 2006, **35**(2): 261—264.
- [5] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, et al. Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(8): 1241—1250.
- [6] Hayat M M, Torres S N, Armstrong E, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays[J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(8): 772—780.
- [7] ZHANG Tian-Xu, SHI Chang-Cheng, LI Jie-Jun, et al. Overview of research on the adaptive algorithms for nonuniformity correction of infrared focal plane array[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序,施长城,李洁珺,等.红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究进展.红外与毫米波学报), 2007, **26**(6): 409—413.
- [8] Dunne B E, Williamson G A. QR-based TLS and mixed LS-TLS algorithms with applications to adaptive IR filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, **51**(2): 386—394.
- [9] Huffer S V, Vandewalle J. *The total least squares problem: computational aspects and analysis*[M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1991.