

场景自适应的红外焦平面阵列非均匀性校正新方法

赖睿, 杨银堂

(西安电子科技大学 微电子学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 提出了一种基于神经网络的红外焦平面阵列 (IRFPA) 非均匀性自适应校正方法, 重新设计了隐含层结构以获得更接近真实信号的期望信号, 此外, 还将变步长归一化 LMS (VSS-NLMS) 自适应滤波技术引入到校正参数的迭代估计过程中, 以实现校正速度和稳定性的提升. 实验结果表明, 该方法在校正精度、收敛速度和稳定性方面的性能均显著优于传统的神经网络校正算法.

关键词: 红外成像; 红外焦平面阵列; 降噪; 神经网络; 自适应滤波

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)02-0228-05

Novel scene adaptive method for non-uniformity correction in infrared focal plane arrays

LAI Rui, YANG Yin-tang

(School of Microelectronic, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A neural network based scene-adaptive non-uniformity correction (NUC) algorithm for infrared focal plane arrays (IRFPA) is proposed. This method redesigns the structure of the hidden layer, which is helpful to estimate the desired target value more precisely. In addition, the variable step size normalized LMS (VSS-NLMS) based adaptive filtering technique is introduced to the correction parameter estimation process, which yields faster convergence and higher stability. Anyway, the proposed NUC method achieves high performance in correction precision, convergence rate and stability, which is validated by experimental results.

Key Words: infrared imaging; infrared focal plane arrays; noise abatement; neural networks; adaptive filtering

红外焦平面阵列 (IRFPA) 探测器的引入使得现代红外成像系统能同时获得在空间分辨率、温度分辨率和时间分辨率方面的优异性能. 然而, 受到材料、制造工艺和工作环境等因素的影响, IRFPA 各探测元在相同辐照条件下通常会输出不同的响应, 这种响应的不一致性被称作非均匀性 (Non-uniformity)^[1-2], 亦称作固定模式噪声 (FPN). 由于非均匀性的存在会显著降低成像的信噪比和解析率, 因此, 在基于 IRFPA 的成像应用中, 几乎都要进行非均匀性校正 (NUC). 此外, IRFPA 响应的空间非均匀性会随着时间的推移而缓慢变化, 这也是非均匀性校正中必须解决的问题.

为了消除空间非均匀性变化对非均匀性校正的影响, 基于参考源的校正方法只能以周期性停机定标的方式来获取新的校正参数, 这显然降低了成像系统的实用性. 为了克服上述局限, 基于场景的校正方法利用成像系统正常运行时所获取的图像数据不断更新校正参数以补偿 IRFPA 固有的非均匀响应^[3]. 在众多基于场景的校正方法中, Scribner 等人提出的神经网络法^[4]以及 Sergio 等人提出的改进方法^[5], 以其较好的自适应性和较强的参数漂移追踪能力而成为空域处理的典型代表. 笔者在深入研究上述两种方法的基础上, 提出了一种基于神经网络自适应滤波的非均匀性校正方法, 该方法重新设计了神经网络的隐含层结构, 以提高校正精度, 并在校正参数的更新过程中选用收敛速度更快的变步长归一化 LMS (VSS-NLMS) 滤波^[6-8]以实现

收稿日期: 2008-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助 (60377034)

作者简介: 赖睿 (1980-), 男, 讲师, 博士, E-mail: rlai@mail.xidian.edu.cn.

对校正速度的提升.

1 基于神经网络的 NUC 方法

受到人类视觉系统的启发, Scribner 等人创造性地提出了类视网膜结构的神经网络以实现参数递归估计的自适应校正方法. 该方法采用探测器的线性响应模型, 因此, 焦平面上 (i, j) 探测元的校正输出可表示为

$$\hat{Y}_{ij}(n) = \mathbf{W}_{ij}^T(n) \cdot \mathbf{X}_{ij}(n) \quad (1)$$

式中 $\hat{Y}_{ij}(n)$ 和 $\mathbf{X}_{ij}(n) = (\mathbf{x}_{ij}(n), 1)^T$ 分别表示 n 时刻的校正值和观测值, $\mathbf{W}_{ij}(n) = (\hat{\mathbf{g}}_{ij}(n), \hat{\mathbf{o}}_{ij}(n))^T$ 则表示校正参数矩阵, 其中 $\hat{\mathbf{g}}_{ij}(n)$ 和 $\hat{\mathbf{o}}_{ij}(n)$ 分别为增益和偏移参数.

由于校正参数的回归估计是在最小均方误差(MMSE)准则下进行的, 为此, 定义代价函数为以下均方误差

$$\mathbf{J}_{ij}(n) = E\{|\mathbf{E}_{ij}(n)|^2\} = E\{|\mathbf{T}_{ij}(n) - \hat{Y}_{ij}(n)|^2\} \quad (2)$$

其中 $E\{\cdot\}$ 为统计期望算子, $\mathbf{T}_{ij}(n)$ 为探测元的期望输出, 通常取局部空间灰度的均值.

利用最陡下降法, 得到校正参数的迭代更新公式

$$\mathbf{W}_{ij}(n+1) = \mathbf{W}_{ij}(n) - \mu \nabla \mathbf{J}_{ij}(n) / 2 \quad (3)$$

式中 ∇ 为偏倒算子.

将式(1), (2)代入式(3), 可得到增益和偏移参数的迭代式

$$\hat{\mathbf{g}}_{ij}(n+1) = \hat{\mathbf{g}}_{ij}(n) + \eta \mathbf{E}_{ij}(n) \mathbf{x}_{ij}(n) \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{o}}_{ij}(n+1) = \hat{\mathbf{o}}_{ij}(n) + \eta \mathbf{E}_{ij}(n) \quad (5)$$

其中 η 为步长因子.

2 基于神经网络的 VSS-NLMS 滤波校正方法

笔者提出了如图 1 所示的神经网络自适应滤波校正新方法, 较之传统的神经网络校正方法, 该方法进行了如下改进: (1)重新设计了隐含层以提高校正精度; (2)选用 VSS-NLMS 滤波取代 LMS 滤波以加快收敛速度并提高稳定性.

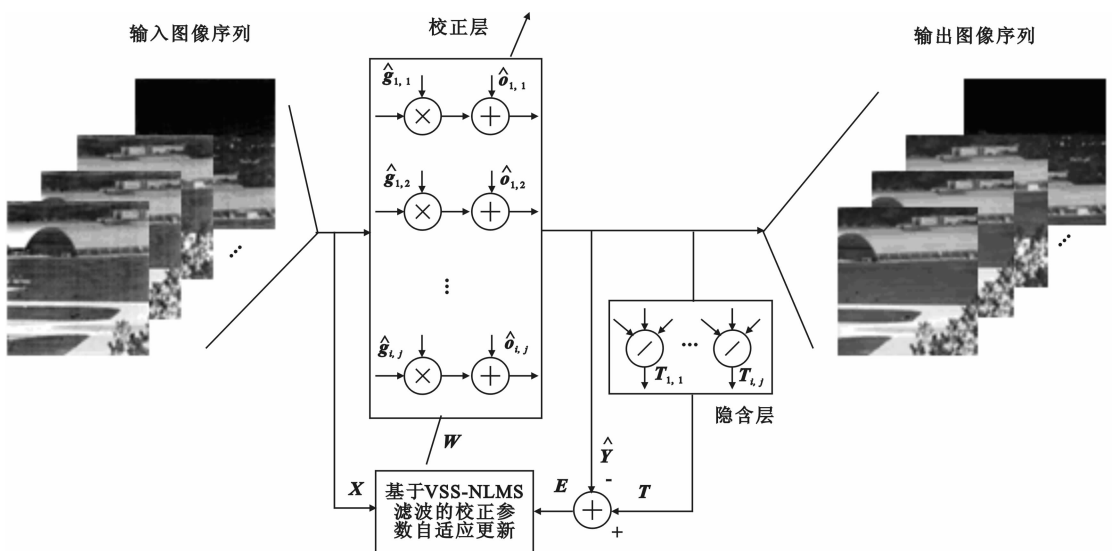


图 1 基于神经网络自适应滤波的非均匀性校正原理

2.1 新的隐含层设计

在传统的神经网络方法中, 隐含层通过计算紧邻探测元的响应均值来估计期望输出 T , 这常常会引起校正后的图像出现模糊. 图 1 中隐含层的设计充分考虑了紧邻像元的空间距离对期望输出估计值的影响, 根

据距离远近分配相应的权值. 新的隐含层期望输出可表示为

$$\mathbf{T}_{ij}(n) = \frac{\sum_{u=i-L}^{i+L} \sum_{v=j-L}^{j+L} \mathbf{K}_{uv}(n) \mathbf{X}_{uv}(n)}{\sum_{u=i-L}^{i+L} \sum_{v=j-L}^{j+L} \mathbf{K}_{uv}(n)}, \quad (6)$$

其中加权核函数 $\mathbf{K}_{uv}(n)$ 为
$$\mathbf{K}_{uv}(n) = \exp\left(-\frac{d^2([\mathbf{u}, \mathbf{v}], [\mathbf{i}, \mathbf{j}])}{2\sigma_d^2}\right), \quad (7)$$

式中 $d(\cdot)$ 表示欧几里德距离, σ_d^2 为空间几何方差.

2.2 基于 VSS-NLMS 滤波的校正参数估计

LMS 算法的计算复杂度低、结构简单, 因此, 在自适应信号处理中得到广泛使用, 然而, 它的收敛速度慢, 收敛速度与自适应步长和失调之间存在着矛盾^[9]. 作为改进方法的 VSS-NLMS 滤波算法利用局部方差调节步长, 其步长调节的核心思想是: 在局部方差大时, 加大步长以提高跟踪速度, 反之, 则减小步长以降低失调. 此外, VSS-NLMS 算法还选择归一化的步长参数来提高算法的收敛速度和稳定性.

基于上述分析, 利用 VSS-NLMS 自适应滤波算法以实现非均匀性校正参数的回归估计, 其校正参数的迭代更新公式为

$$\mathbf{W}_{ij}(n+1) = \mathbf{W}_{ij}(n) + \frac{\tilde{\eta}_n}{\mathbf{X}_{ij}^T(n) \cdot \mathbf{X}_{ij}(n) + c} \mathbf{E}_{ij}(n) \mathbf{X}_{ij}(n), \quad (8)$$

式中常数 c 为正则化参数, 用于避免 $\mathbf{X}_{ij}^T(n) \cdot \mathbf{X}_{ij}(n)$ 取值过小带来的归一化步长取值突变.

根据式(1), (2)和式(8), 可得到基于 VSS-NLMS 滤波的增益和偏移参数迭代公式

$$\hat{\mathbf{g}}_{ij}(n+1) = \hat{\mathbf{g}}_{ij}(n) + \frac{\tilde{\eta}_n}{\mathbf{x}_{ij}^2(n) + c} \mathbf{E}_{ij}(n) \mathbf{x}_{ij}(n), \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{o}}_{ij}(n+1) = \hat{\mathbf{o}}_{ij}(n) + \frac{\tilde{\eta}_n}{\mathbf{x}_{ij}^2(n) + c} \mathbf{E}_{ij}(n), \quad (10)$$

其中变步长系数 $\tilde{\eta}_n$ 由局部方差控制, 其表达式为

$$\tilde{\eta}_{k+1} = \begin{cases} \eta_{\max} & , \quad \eta'_{k+1} > \eta_{\max} \\ \eta_{\min} & , \quad \eta'_{k+1} < \eta_{\min} \\ \eta'_{k+1} & , \quad \text{其他} \end{cases}, \quad (11)$$

其中 $\eta'_{k+1} = \alpha \tilde{\eta}_k + \beta \mathbf{E}_{ij}^2(k)$.

3 仿真实验及结果分析

仿真实验将用 Scribner 算法、Sergio 算法和笔者提出的算法分别对模拟非均匀性数据及实际红外数据进行非均匀性校正, 并从视觉效果和性能指标两方面比较校正效果.

3.1 基于模拟非均匀性数据的仿真实验

首先对标准测试图像序列“Salesman”加入一定强度的固定模式噪声, 而后, 分别利用上述 3 种方法对该图像序列进行非均匀性校正, 并利用均方根误差 (RMSE) 准则对校正结果进行量化评估. 图 2 为不同方法对 300 帧图像进行逐帧校正后所得到的 RMSE 曲线, 可见, 随着迭代校正过程的进行, 上述几种方法所对应的 RMSE 曲线都出现了收敛稳定的过程, 比较而言, 笔者提出的方法收敛速度最快, 只经过十多次迭代就基本达到稳定, 且对应的 RMSE 也最小, 说明校正后的残余非均匀性最小.

利用粗糙度参数 ρ 来量化对比不同校正方法经 300 次迭代后的校正效果. 这里, 参数 ρ 是通过度量图像的粗糙程度来评估非均匀性的, 其取值越小则表明图像非均匀性越小, 该参数的数学表达式为^[10]

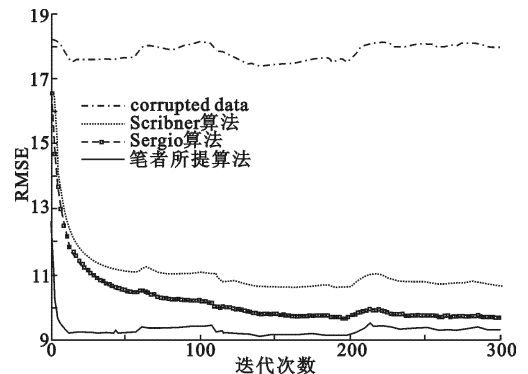


图 2 不同校正算法对模拟非均匀性图像序列校正后的 RMSE 曲线

$$\rho = (\|h_1 * f\|_1 + \|h_2 * f\|_1) / \|f\|_1, \quad (12)$$

式中 f 表示被度量的图像, h_1 表示水平差分模板 $[1, -1]$, $h_2 = h_1^T$ 表示垂直差分模板, 而 $\|\cdot\|_1$ 则表示 L_1 范数. 实验结果如表 1 所示, 据表中的数据分析可知, 该方法校正后图像对应的 ρ 值最小, 因此, 校正效果最好.

表 1 不同算法 300 帧迭代后的 ρ 参数对比

性能参数	原图	模拟 FPN 图像	校正后图像		
			Scribner 方法	Sergio 方法	笔者所提方法
ρ	0.20588	0.78604	0.43511	0.35570	0.31406

3.2 基于实际红外数据的仿真实验

利用上述 3 种算法分别对某国多功能光电传感器实验室用 16 位 128×128 阵列 InSb IRFPA 相机所采集到的红外图像序列进行校正, 实验具体步骤是: 首先, 将图像序列中的第 710 帧作为起始帧, 而后, 经过 15 次的校正参数迭代更新, 得到第 725 帧所对应的校正参数, 最后, 运用该校正参数对当前帧进行非均匀性校正, 校正结果如图 3 所示, 其中, 图 3(a) 为第 725 帧原始图像, 图 3(b)~(d) 分别为 Scribner 算法、Sergio 算法以及文中方法的校正结果, 从视觉效果的对比而言, 文中方法对表现为网格状条纹的非均匀性抑制效果最好, 且校正后的图像场景细节更加平滑清晰.

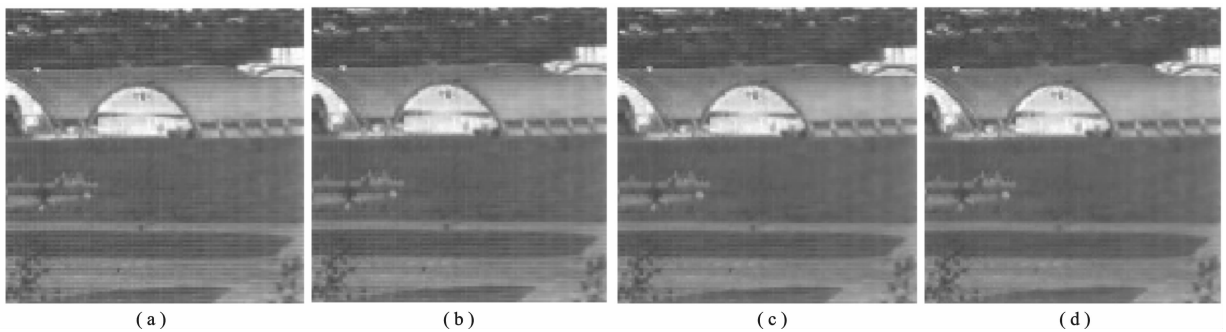


图 3 不同方法对实际红外图像校正后的视觉效果

此外, 实验再次借助参数 ρ 来度量图 3 中各图的粗糙度, 并以此量化对比上述 3 种校正算法对实际红外图像的校正效果. 表 2 所示的实验结果表明经文中方法校正后的红外图像具有相对较小的粗糙度, 均匀性更好.

表 2 不同算法对实际红外图像校正后的 ρ 参数对比

性能参数	原图	校正后图像		
		Scribner 方法	Sergio 方法	笔者所提方法
ρ	0.17811	0.16148	0.15084	0.14471

4 结束语

提出了一种基于神经网络的 IRFPA 非均匀性自适应校正方法, 该方法运用了新的 VSS-NLMS 滤波技术以加快校正参数估计过程的收敛速度并减小失调, 此外, 还改进了神经网络的隐含层结构以提高校正精度, 基于模拟非均匀性图像序列和真实红外图像序列的仿真实验结果证实了文中方法在视觉效果和性能指标上均优于传统的神经网络方法.

参考文献:

[1] 王炳健, 刘上乾, 赖睿, 等. 基于神经网络的红外焦平面非均匀性自适应校正算法[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(6): 405-407.

Wang Bingjian, Liu Shangqian, Lai Rui, et al. Adaptive Non-uniformity Correction Algorithm for IRFPA Based on Neural Network[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(6): 405-407.

- [2] 赖睿, 刘上乾, 杨银堂, 等. 一种基于 LTS-HD 测度的低信噪比图像鲁棒配准方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(6):902-906.
Lai Rui, Liu Shangqian, Yang Yintang, et al. A LTS-HD Measure Based Robust Registration Approach to Low SNR Images[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(6):902-906.
- [3] 姜光, 周慧鑫, 王炳健, 等. 基于场景运动分析的红外图像非均匀性校正[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(1): 81-84.
Jiang Guang, Zhou Huixin, Wang Bingjian, et al. Nonuniformity Correction of Infrared Image Sequences Based on the Scene Moving Analysis[J]. Journal of Xidian University, 2003, 30(1): 81-84.
- [4] Scribner D, Sarkady K, Kruer M. Adaptive Nonuniformity Correction for Infrared Focal Plane Arrays Using Neural Networks[C]//Proc of Infrared Sensors, Detectors, Electronics, and Signal Processing: 1541. San Diego: SPIE, 1991: 100-109.
- [5] Torres S N, Martin C S, Sbarbaro D G, et al. A Neural Network for Nonuniformity and Ghosting Correction of Infrared Image Sequence[J]. LNCS, 2005(3656): 1208-1216.
- [6] Kim J, Poularikas A. Comparison of Two Proposed Methods in Adaptive Noise Canceling[C]//Proc of the 35th Southeastern Symposium System Theory. Morgantown: IEEE, 2003: 400-403.
- [7] Kim J, Lee C W, Lee J K, et al. Comparison of Adaptive Systems for Noise Reduction in Speech Performance[C]//Proc of the 38th Southeastern Symposium on System Theory. Cookeville: IEEE, 2006: 123-127.
- [8] Manoakis D G, Ingle V K, Kogon S M. Statistical and Adaptive Signal Processing[M]. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [9] Kwong R H, Johnston E W. A Variable Step Size LMS Algorithm[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1992, 40(7): 1663-1642.
- [10] Godoy S E, Torres S N, Pezoa J E, et al. Nonuniformity Correction Algorithm Based on a Noise-Cancellation System for Infrared Focal-Plane Arrays[C]//Proc. of Infrared Technology and Applications XXXIII: 6542. Orlando: SPIE, 2007: 65423S1-65423S11.

(编辑: 齐淑娟)

(上接第 215 页)

- [2] Marzetta T L, Hochwald B M. Capacity of a Mobile Multiple-antenna Communication Link in Rayleigh Flat Fading[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1999, 45(1): 139-157.
- [3] Hochwald B M, Marzetta T L. Unitary Space-time Modulation for Multiple-antenna Communications in Rayleigh Flat Fading[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2000, 46(2): 543-564.
- [4] Hochwald B M, Marzetta T L, Richardson T J, et al. Systematic Design of Unitary Space-time Constellations[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2000, 46(6): 1962-1973.
- [5] Alamouti S M. A Simple Transmitter Diversity Scheme for Wireless Communications[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [6] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time Block Codes from Orthogonal Designs[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 1999, 45(5): 1456-1467.
- [7] Tarokh V, Kim M. Existence and Construction of Noncoherent Unitary Space-time Codes[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2002, 48(12): 3112-3117.
- [8] Zhao Wanlun, Leus G, Giannakis G B. Orthogonal Design of Unitary Constellations for Uncoded and Trellis-coded Noncoherent Space-time Systems[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2004, 50(6): 1319-1327.
- [9] Panagos A, Kosbar K. A New Design Metric for Unitary Space-time Codes[C]//IWCMC 2006-Proceedings of the 2006 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. New York: Association for Computing Machinery, 2006: 671-675.
- [10] Moustakas A L, Simon S H, Marzetta T L. Capacity of Differential versus Non-Differential Unitary Space-Time Modulation for MIMO channels[J]. IEEE Trans on Inform Theory, 2006, 52(8): 3622-3634.

(编辑: 高西全)