

红外焦平面阵列非均匀性 自适应校正算法研究*

姜 光 刘上乾

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西, 西安, 710071)

摘要 在分析红外焦平面阵列非均匀性校正现行算法的基础上, 提出了一种具有自适应性能的新算法. 该算法以小波变换中的滤波器理论为基础, 通过将图像序列在时间域的尺度分解和相应统计量计算, 获得在红外焦平面校正中起影响的偏置和增益系数. 模拟实验结果验证了其有效性和先进性.

关键词 红外焦平面阵列, 非均匀性校正, 自适应, 小波.

ADAPTIVE NONUNIFORMITY CORRECTION OF IRFPA*

JIANG Guang LIU Shang-Qian

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Based on the analysis of the present algorithms of IRFPA nonuniformity correction (NUC), a new adaptive technique was discussed, to which the wavelet filter theory was applied. With the scale decomposition of image sequences on the time field and the corresponding statistics' calculation, the offset and gain coefficients in IRFPA NUC were obtained. Its effectiveness and superiority were verified by simulation.

Key words IRFPA, nonuniformity correction, adaptive, wavelet.

引言

红外焦平面阵列(IRFPA)器件是当今技术性能最先进的红外探测器,用它构成的红外成像系统较传统的光机扫描红外成像系统具有结构简单、工作稳定可靠、灵敏度高、噪声等效温差(NETD)性能好等优点,是当今国内外重点发展的新一代红外探测器.但由于受探测器材料和工艺水平所限等原因,器件响应的非均匀性较大,难以满足实用要求.例如对于红外成像制导系统,要求 IRFPA 的非均匀性在 0.1% 以内,对于资源卫星上的红外遥感系统的红外焦平面器件的大量均匀性应在 0.5% 左右,最大不能超过 1%,而目前均匀性较好的 PtSi 肖特基势垒器件的非均匀性距上述要求几乎差一个数量级. InSb 器件的非均匀性高达 10% 左右,而 HgCdTe 焦平面器件的非均匀性则更大.为缓解这种需求矛盾,通常采用两种技术途径:一是继续提高 IRFPA 器件的研制、生产水平,进一步降低器件

的非均匀性,这是一条最基本的技术途径,但投资巨大、收效较慢,尤其是当器件的研制水平已接近国家基础工业的水平时,再提高器件的性能难度就更大;另一条技术途径是利用现代信号处理技术对 IRFPA 的非均匀性进行实时校正.这是一条投入少,收效甚大的技术途径.

多年来,人们相继探讨了多种非均匀性校正方法^[1,2,3],目前使用最为广泛的是基于两个辐照度定标两点校正算法,它具有简单、易于实现等优点,但是适用的动态范围有限,为此本文提出了一种基于小波技术的自适应算法.

1 两点校正算法

两点校正算法如图 1 所示.假设红外探测器在两个定标点 φ_H 、 φ_L 区间的特性曲线可用直线近似见图 1(a),则多元探测器的特性可用图 1(b)表示,两点校正就是使 IRFPA 器件的各个探测器像元在定标区间内在相同辐照度下有相同的输出见图 1(c).

* 国家自然科学基金(编号: 69677010)资助项目
稿件收到日期 2000-05-29,修改稿收到日期 2000-12-14

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 69677010).

Received 2000-05-29, revised 2000-12-14

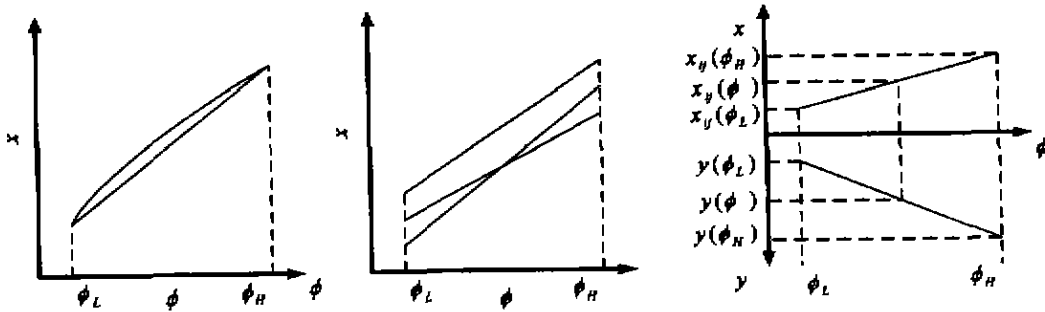


图 1 (a) 特性曲线的直线近似 (b) 多元探测器的非均匀性 (c) 两点校正算法示意图
 Fig. 1 (a) Linear approximation (b) Nonuniformity of the detectors
 (c) Schematic diagram of two-point nonuniformity correction

对于 (i, j) 探测器单元的输出为:

$$y(\phi) = G_{ij}x_{ij}(\phi) + O_{ij}, \quad (1)$$

式(1)中 G_{ij}, O_{ij} 分别为探测器单元的增益系统和偏置; 由图 1(b)可见, IRFPA 器件的非均匀性具体表现在各探测器单元的增益系数和偏置的不同. 两点式非均匀性校正利用

$$G_{ij} = \frac{y_{ij}(\phi_H) - y_{ij}(\phi_L)}{x_{ij}(\phi_H) - x_{ij}(\phi_L)}, \quad (2)$$

$$O_{ij} = \frac{y_{ij}(\phi_L)x_{ij}(\phi_H) - y_{ij}(\phi_H)x_{ij}(\phi_L)}{x_{ij}(\phi_H) - x_{ij}(\phi_L)} \quad (3)$$

的映射关系, 将各探测器单元的增益系数和偏置归一化, 实现每个探测器单元在相同辐照条件下具有相同的响应输出.

两点校正的不足之处是:

(1) 动态范围小, 当辐照度变化较大时, 会引入较大的误差;

(2) 必须事先了解 IRFPA 各探测器单元在两个定标点之间的特性曲线的线性度, 以确定算法中的参数;

(3) 若探测器单元的响应特性随时间或应用环境条件的不同而发生变化时, 将会引起较大的校正误差. 为克服上述的不足, 本文提出了自适应非均匀性校正算法.

2 自适应校正算法

本文利用小波变换理论建立了一种具有自适应性能的 IRFPA 非均匀性校正算法.

小波变换可以将离散时间信号分解为一系列分辨率下的离散逼近和离散细节. 对一维信号 $f(t) \in V_{J_1}$ (J_1 为一确定整数) 可表示为:

$$f(t) = A_{J_1}f(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_{J_1, k} \varphi_{J_1, k}(t), \quad (4)$$

其中数列 $\{C_{J_1, k}\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 具有有限长度 N_{J_1} . 依照 Mallat 算法^[4,5], 信号 $f(t)$ 可分解成不同通道的成分:

$$f(t) = A_{J_1}f(t) + \sum_{l=J_1-1}^{J_2} D_l f(t), \quad (5)$$

其中

$$A_{J_2}f(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} C_{J_2, k} \varphi_{J_2, k}(t), \quad (6)$$

是信号的频率低于 2^{-J_2} 的成分, 数列 C_{J_2} 称为在分辨率 2^{J_2} 下的离散逼近.

$$D_l f(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} D_{l, k} \Psi_{l, k}(t), \quad (7)$$

是信号的频率介于 2^{-l} 与 $2^{-(l-1)}$ 之间的成分, 数列 D_l 称为在分辨率 2^l 下的离散细节. 我们可用滤波过程描述以上算法(见图 2).

离散逼近和离散细节可按 Mallat 的塔式算法由 C_{J_1} 出发递归地得到:

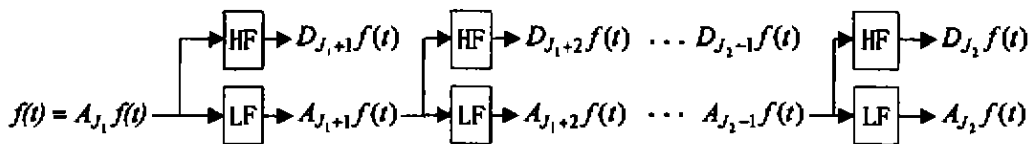


图 2 信号分解中的滤波过程
 Fig. 2 Filtering process in signal decomposition

$$\begin{aligned} C_{j+1} &= HC_j, \\ D_{j+1} &= GC_j, \end{aligned} \quad (j = J_1, \dots, J_2 - 1), \quad (8)$$

其中算子 H 作用在某一序列 $a = \{a_k\}_{k \in Z}$ 上的效果是

$$(Ha)_n = \sum_{k \in Z} h_{k-2^n} a_k, \quad (9)$$

算子 G 的效果是

$$(Ga)_n = \sum_{k \in Z} g_{k-2^n} a_k, \quad (10)$$

其中 $\{h_k\}_{k \in Z}$ 与 $\{g_k\}_{k \in Z}$ 是由尺度函数 $\varphi(t)$ 和小波函数 $\Psi(t)$ 所决定的数列。

利用上述分解算法, 我们选择合适的小波, 在时间域上分解探测器单元的响应信号 $x_{ij}(t)$ 到某一尺度 J_2 , 将信号 $x_{ij}(t)$ 分解为低频(小于 2^{-J_2})的成分 $A_{J_2} x_{ij}(t)$ 和频率介于 2^{-j} 与 $2^{-(j-1)}$ 之间的成分 $D_{j_n} x_{ij}(t)$ ($J_n = J_1 + 1, \dots, J_2$)。假设 J_2 充分大, $A_{J_2} x_{ij}(t)$ 反映信号 $x_{ij}(t)$ 的基频分量, 在实际应用中, 选择合适尺度 J_2 , 计算 $A_{J_2} x_{ij}(t)$ 的一阶统计量以求得该探测器单元偏置分量。

$$O_{ij} = E[A_{J_2} x_{ij}(t)], \quad (11)$$

该探测器单元的增益系数可利用某一尺度下的 $D_{j_n} x_{ij}(t)$ 的二阶统计量 ($J_n = J_1 + 1, \dots, J_2$), 经归一化求得

$$G_{ij} = \left\{ \frac{\text{var}[D_{j_n} x_{ij}(t)]}{\sum_{j'} \text{var}[D_{j'} x_{ij}(t)]} \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \frac{[D_{j_n} x_{ij}(t)]^2}{\sum_{j'} [D_{j'} x_{ij}(t)]^2} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

$D_{j_n} x_{ij}(t)$ 作为红外信号 $x_{ij}(t)$ 通过带滤波器组的输出, 不仅反映了空间频率的变化, 也反映了相机相对景物运动的速度, 合理选择 J_n 可有效提高算法精度和收敛速度, 并消除部分高频噪声的干扰。

3 计算机模拟结果

用可见光 CCD 相机采集 128×128 像元的图像序列, 在各像元点加入不同的偏置和增益系数模拟红外 CCD 相机采集的具有非均匀性的图像, 利用上述算法进行校正计算。图 3(a) 是选取该图像序列的

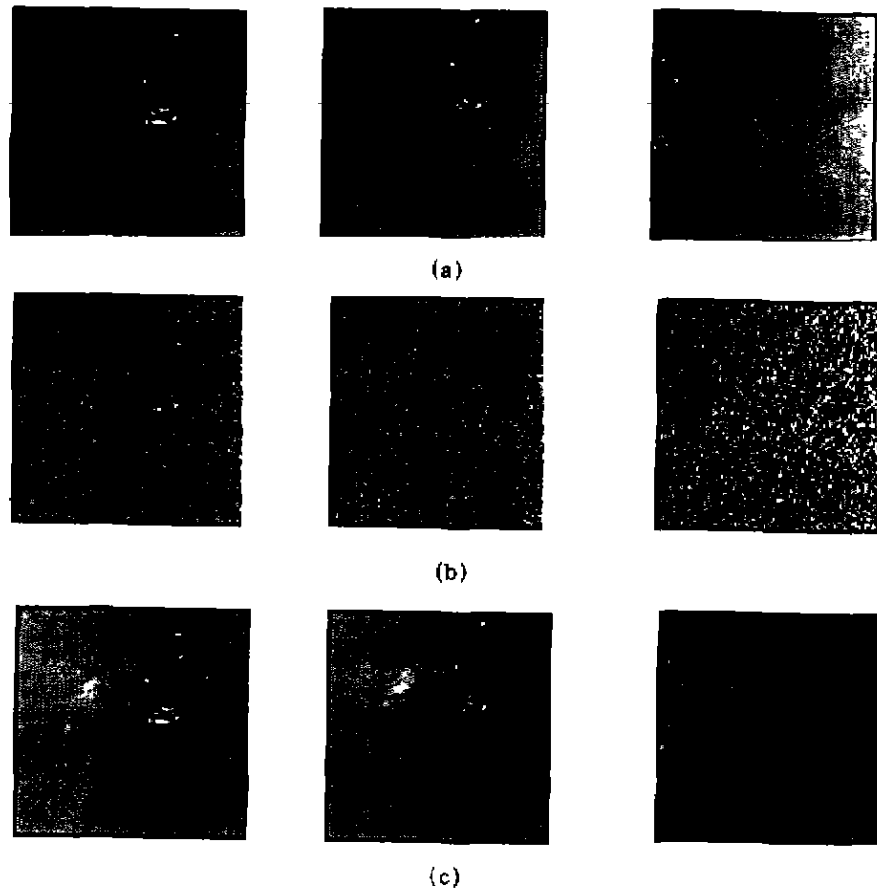


图 3 (a)原始图像 (b)仿真图像 (c)校正图像
Fig. 3 (a) original images (b) Simulation images (c) Corrected images

3幅原始图像,图3(b)是图3(a)对应的3幅仿真图像,图3(c)是图3(b)对应仿真图像的校正图像。

4 结语

(1) 利用小波算法可较好地实现红外焦平面阵列的非均匀性校正,在上述仿真中,非均匀性由55%降低到4%以下,即降低了一个数量级;

(2) 公式(1)中的偏置和增益系数在实现应用中表现为慢变化量,通过上述滤波器的选取和统计平均计算,可以达到较好的慢变化自适应;

(3) 小波函数和滤波器的构造对于不同的应用场合可有不同的选择;

(4) 使用 Mallat 分解算法,可使校正运算的时间开销相对较小。

REFERENCES

- [1] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction using the constant-statistics constraint: analog and digital implementation, *SPIE*, 1997, **3061**: 895—905
- [2] Scribner D A, Sarkady K A, Krueer M R. *et al.* Adaptive nonuniformity correction for IR focal plane arrays using neural networks, *SPIE*, 1991, **1541**: 100—110
- [3] Venkateswarlu R, Er M N, Gan Y H. *et al.* Nonuniformity compensation for IR focal plane array sensors, *SPIE*, 1997, **3061**: 915—925
- [4] Mallat S. A theory for multi-resolution signal decomposition; the wavelet representation, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**: 674—693
- [5] Mallat S. Multi-frequency channel decomposition of images and wavelet models, *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1989, **37**: 2091—2110