

红外焦平面阵列非均匀性实时校正技术研究

祝永坚 陈 钱

(南京理工大学电光学院, 江苏南京, 210094)

摘 要 在分析红外焦平面阵列非均匀性噪声产生机理的基础上, 提出了一种易于硬件实现的新算法, 并给出了其硬件实现。该算法从数字图像处理的角度出发, 通过垂直滤波和排序均值滤波, 对非均匀性进行校正。利用该算法能实时有效地消除红外图像的非均匀性噪声, 增强图像的视觉质量。

关键词 非均匀性校正 红外焦平面阵列 实时视频处理 图像增强

Real-time Nonuniformity Correction Technique for IRFPA

ZHU YongJian CHEN Qian

(School of Electronics and Optics, Nanjing University of Science and
Technology, Nanjing Jiangsu, 210094)

Abstract: Based on the analysis of the generating mechanism of nonuniformity noise in IRFPA, a new correction method using the digital image processing technique was presented. With vertical filtering and reorder average filtering, the nonuniformity noise were corrected effectively in real time. And its hardware implementation were also presented. By adopting this technique in an infrared imaging system, the visual quality of the infrared image was improved greatly.

Key words: nonuniformity correction, IRFPA, real-time video processing, image enhancement

1 引言

红外焦平面阵列 (IRFPA) 是当今国内外重点发展的新一代红外探测器, 具有结构简单、工作稳定可靠、灵敏度高等优点。但由于受探测器材料和工艺水平等原因的限制, 红外探测器具有非均匀性。这种非均匀性会影响系统的成像质量, 降低空间分辨率和温度分辨率, 因此对非均匀性的校正显得非常重要。校正焦平面探测器非均匀性的算法以及改进算法已经有很多种,

目前较为成熟的方法是基于探测元的两点温度定标法和多点温度定标法。而基于场景的校正方法近年来也出现了许多研究成果, 如恒定统计平均法 (CS)、人工神经网络法 (ANNC) 和时域高通滤波法 (THPFC) 等。最近国内外又研究出基于场景的代数算法、基于干扰抵消原理的自适应校正法和基于低次插值的多点校正算法等。但这些算法总是面向某种特定的条件和工作模式, 适应性不强。而且大部分算法由于算法

收稿日期: 2005-06-02

作者简介: 祝永坚 (1981 —), 男, 南京理工大学电光学院 2002 级博士研究生, 主要从事光电信号处理与数字视频技术、微光与红外图像处理及视景生成等方面的研究。

复杂度高, 计算量大, 需要几十帧甚至更长的时间, 根本谈不上实时。这在诸如预警、跟踪等实时要求很高的场合就显得无法容忍了。为此本文提出一种新的非均匀性校正算法。

2 非均匀性产生原因分析

红外焦平面探测器的响应非均匀性问题不同于一般的图像噪声。一般的图像噪声是瞬态随机噪声, 可以通过帧/场处理的方法来消除。探测器的非均匀性是一种固定图形噪声, 它是由探测器的加工工艺、材料、温度和偏置情况的不均匀性造成的。红外探测器的非均匀性主要包含以下几个方面: 第一是空间的非均匀性, 也就是不同敏感元对同一光通量的响应率不同。个别敏感元甚至对不同的光通量的响应不变或发生很小的变化, 也就是盲元。第二是时间非均匀性, 指同一敏感元在不同时间对相同光通量的响应不同, 即非均匀性是时变的。第三是探测器各敏感元对同一光通量增益的响应不同, 即非线性。因此, 可以认为红外探测器的非均匀性会随着时间、空间、温度等变化。

对于 n 元阵列探测器 ($i = 1, 2, \dots, n$), 由于其响应度的非均匀性存在, 在同样的入射照度 E 作用下, 各个敏感元会产生不同的输出信号 $V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sn}$ 。对于探测器响应度的非均匀性 (PRUN), 一般定义为: 各探测单元在二分之一饱和辐射量下所输出的原始响应等效电压与其平均值之比, 即

$$PRUN = \frac{1}{\bar{V}_s} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{si} - \bar{V}_s)^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, \bar{V}_s 为探测器各单元原始响应信号的平均值。

若探测器的光谱响应度 $R_\lambda = V_{\lambda s} / \varphi_\lambda$ 与波长无关, 并且设无照射辐射时探测器输出的暗电流信号为 V_{oi} , 于是探测器的响应关系为

$$V_{si} = R_i \varphi + V_{oi} \quad (2)$$

式中, $\varphi = \frac{\pi}{4F^2} e \tau_0 \tau_a A_c \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda$ 表示汇聚在探

测器焦平面上的景物辐射功率。

在理想情况下, 探测器单元在达到饱和前, 产生的信号应与辐射量成线性关系。但实际上探测单元具有非线性响应特性, 即对于不同的入射辐射, 探测器具有不同的响应度, 也就是说公式 (2) 中的 R_i 不是常数, 它随 φ 变化而变化, 而且不同探测单元的 R_i 响应曲线也不同, 因此导致了探测器的非均匀性。

3 新的非均匀性校正算法

两点温度定标法和多点温度定标法都属于基于探测元定标的校正方法, 要求在特定温度下用黑体产生的均匀辐射对 IRFPA 进行定标, 定标时镜头不能正常工作。由于随着时间和温度的变化, 定标得出的校正增益和校正偏移会改变, 所以需要经常对 IRFPA 进行重新定标。这很麻烦, 并且在战场上不适用。因此目前的研究主要集中在基于场景的非均匀性校正技术上。但很多基于场景的非均匀性校正算法太复杂, 难于用硬件实现, 更不可能实时实现。在此, 我们提出一种新的简单易实现的基于场景的实时非均匀性校正算法。

焦平面探测器, 尤其是扫描型阵列探测器, 非均匀性主要体现在图像的水平纹理上, 因此我们可以借鉴数字图像处理的思想。均值滤波和中值滤波是数字图像去噪处理的经典算法, 但是均值滤波在降低噪声的同时会使图像变得很模糊, 而中值滤波只是在一定条件下保护图像边缘, 而且当窗口内像素点的灰度值在高低两端分布较多时, 滤波结果将和实际情况有较大的偏差。因此它们在处理红外图像的非均匀性噪声上就略显不足。针对非均匀性在图像上呈现水平纹理的特点, 我们提出一种算法: 排序均值垂直滤波算法。

用模板 $M = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ 在图像上滑动, 取与像

素 $X(i, j)$ 相邻的同列四个像素, 组成数组序列:

$$N = \begin{bmatrix} X(i, j-2) \\ X(i, j-1) \\ X(i, j) \\ X(i, j+1) \\ X(i, j+2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对数组序列 N 中的元素进行均值计算, 得到

$$\bar{X} = [X(i, j-2) + X(i, j-1) + X(i, j) + X(i, j+1) + X(i, j+2)]/5 \quad (4)$$

$$N' = |N - \bar{X}| = \begin{bmatrix} |X(i, j-2) - \bar{X}| \\ |X(i, j-1) - \bar{X}| \\ |X(i, j) - \bar{X}| \\ |X(i, j+1) - \bar{X}| \\ |X(i, j+2) - \bar{X}| \end{bmatrix} \quad (5)$$

对 N' 从小到大进行排序, 取 N' 中最小的 3 个元素, 它们对应的值 \bar{X} 与平均值最相似, 假设这三个元素为 $X(i, j-2)$ 、 $X(i, j-1)$ 和 $X(i, j)$, 他们的均值为 Y, 则把 Y 赋给 $X(i, j)$, 生成校正后的图像 X', 完成非均匀性校正, 即

$$X'(i, j) = Y = [X(i, j-2) + X(i, j-1) + X(i, j)]/3 \quad (6)$$

这个算法能够有效地消除非均匀性带来的水平条纹, 并且能够有效地保护边缘, 防止图像过分模糊。因为边缘是灰度值发生突变的地方, 而且边缘绝对不止一个像素点, 一个像素点的突变就成了噪声, 该算法能有效地判断像素 $X(i, j)$ 在边缘里面还是在外面 (如图 1 所示),

所以就能在平滑红外图像非均匀性水平条纹的同时避免边缘细节模糊 (如图 2 所示)。可以看出, 图中的非均匀性水平条纹已经滤除, 而图像的边缘和细节并未发生严重的模糊。这种算法简单, 可以用硬件实时实现。

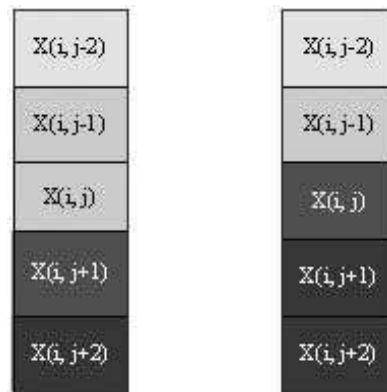
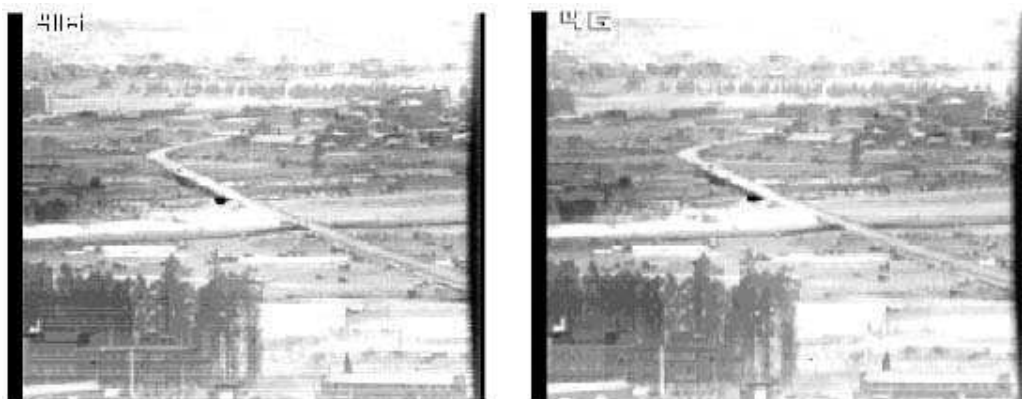


图 1 边缘灰度示意图

4 非均匀性校正的硬件实现

该算法易于用硬件实时实现, 笔者设计的红外图像非均匀性校正实时处理器采用 DSP+FPGA 的架构。DSP+FPGA/CPLD 结构最大的特点是结构灵活, 有较强的通用性, 适合模块化设计, 从而能够提高算法效率, 同时其开发周期较短, 系统易于维护和扩展, 适合于实时信号处理。系统脱机独立运行, 完成 DSP 的 Bootloader 程序自加载, 然后 DSP 再完成对 FPGA 的加载, 大大简化了电路。系统大量采用贴片元器件, 进一步减少了电路板的面积、噪声和功



(a) 原始图像

(b) 非均匀校正后的图像

图 2 原始图像和用该算法校正后的图像

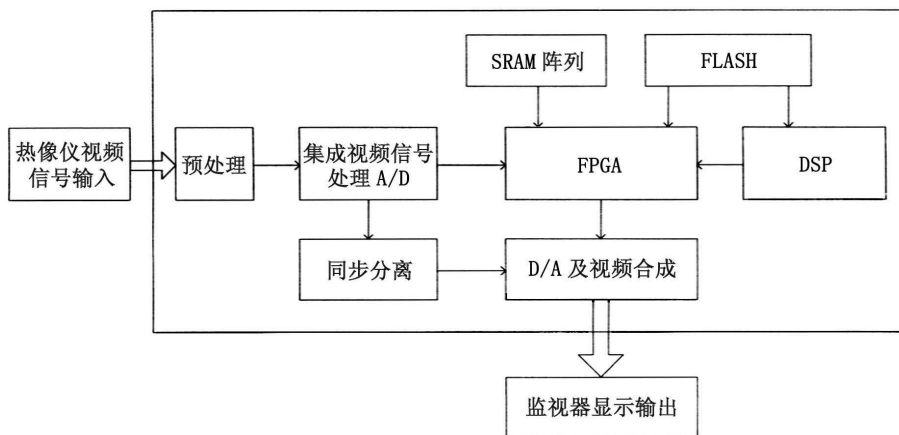


图 3 红外图像实时非均匀校正处理器结构框图

耗；根据抗干扰原则，对高速印刷电路板进行合理的布线和布局，并采用多种抗干扰措施，抑制电路附加噪声，提高了系统的可靠性和稳定性。由于系统的工作频率较高、数据量大，且数据变化快，如果采用异步电路设计，容易处理到数据变化时的不确定状态，产生毛刺，降低系统的稳定性和可靠性，因此采用流水线式的同步电路设计技术，其基本结构如图 3 所示。

由于从红外热像仪输出的视频信号是峰峰值为 1V 的标准全电视信号，幅值较小，因此首先要对视频信号进行放大预处理，以便提高 A/D 转换的精度。然后经过集成视频处理和 A/D 转换，输出数字信号和相关的视频时序信号（经过锁相的像素时钟、行同步、场同步以及奇偶信号等）；FPGA 和 DSP 完成本文的算法（非均匀性校正只是第一步，这个系统还要完成预警和跟踪）；SRAM 阵列用来实时交替更换存储图像，FLASH 中存放着 DSP 和 FPGA 的配置程序，以 FLASH 的最高地址位来区分这两段数据，开机后自动装载。D/A 及视频合成实现数字信号向模拟信号的转变，并将模拟信号和同步信号合成从而得到标准的全电视信号，最后送往监视器进行图像显示。

5 结语

从信息论的角度上看，图像的信息量是由成像器件所决定的。红外图像的信息量是由焦平面探测器决定的，非均匀性减小了图像的信

息量。在不外加其他的信息时，单纯的图像处理和校正是不可能增加其信息量的，只是通过处理滤除无用信息，使之更易观察。因此，非均匀性的校正和图像细节的模糊和丢失是一对不可调和的矛盾。本文基于数字图像处理的思想，提出了一种新的红外图像非均匀性校正算法并用硬件予以实现。该算法实现简单，计算迅速，能够有效地实现红外图像非均匀性的实时校正，得到了较为完美的图像显示质量，在国防、工业检测、医学成像等领域具有很高的实用价值。

参考文献

- [1] Russel C. Hardie, Majeed M. Hayat, Earnest Armstrong, et al. Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration. APPLIED OPTICS, 2000, Vol.39: 1241-1250.
- [2] Bradley M. Ratliff, Majeed M. Hayat, Russell C. Hardie. Algebraic scene-based nonuniformity correction in focal plane arrays. SPIE, 2001, Vol.4372: 114-123.
- [3] WANG Yu, CHEN Qian, YIN Dei-Kui, et al. Real-time nonuniformity correction technique for infrared image. Journal of Infrared and Millimeter Waves. (王钰, 陈钱, 殷德奎等. 实时红外图像非均匀性校正技术研究. 红外与毫米波学报), 1999, 18(2): 151-155.
- [4] ZHENG Ruihong, CHEN Qian. The research of scene-based methods on infrared nonuniformity correction. Optoelectronics Technology. (郑瑞红, 陈钱. 基于场景的红外图像非均匀校正算法的研究. 光电子技术), 2003, 23(4): 241-244.

(下转第 42 页)