

# 非制冷红外焦平面无效像元识别与实时补偿

涂 霞 蒋亚东 罗凤武 王利颖

(电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要** 非制冷红外焦平面阵列(UFPA)不可避免地存在无效像元,这对 UFPA 的成像效果造成了极坏的影响。为解决这一问题,在分析并总结各种非制冷红外焦平面无效像元识别算法优缺点的基础上,提出一种新的无效像元识别与实时补偿方法。根据像元响应特性,采用循环迭代法以搜索最优的无效像元判别阈值,并据此标识出无效像元的位置。在硬件实现阶段,对于  $M \times N$  的 UFPA 器件,在任意采样时刻,利用移位寄存器保存当前采样点之前的  $M$  个响应值,使其输出可实时更新为与采样点同列的上一个数据;同时,利用一般的寄存器实时保存与采样点同行的前一个数据,采用同帧行列间内插法实现无效像元的实时补偿。该算法有效地解决了无效像元识别阈值选取困难及不易实时补偿的问题。针对  $320 \times 240$  的 UFPA 器件,该算法在基于 FPGA 的红外图像处理系统上得以实时实现,成功地消除了无效像元对 UFPA 成像效果的影响。

**关键词** 非制冷红外焦平面阵列;无效像元;循环迭代;实时补偿

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0339

## A Method of Non-Effective Pixel Detection and Compensation of Un-Cooled Infrared Focal Plane Array

Tu Xia Jiang Yadong Luo fengwu Wang Liying

(Key Laboratory of Electronic Film and Integrated Device, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** The non-effective pixels exist in the un-cooled infrared focal plane array (UFPA) inevitably, which has a bad effect on the UFPA imaging. Based on analyzing some kinds of algorithm on the non-effective pixels detection of un-cooled infrared focal plane array, a new method of detection and real-time compensation is presented in this article to solve this problem. First of all, the best threshold of the non-effective pixels detection is searched according to the pixels' response characteristics and the locations of the non-effective pixels are marked as well. When realizing on hardware, for an  $M \times N$  UFPA, at any sampling time, a shift-register is used to store  $M$  data which is before the current sample data and the shift-register's output is updated with the data which is at the same column while the upper row. Meanwhile, a common register is used to store the data which is at the same row while the previous column. Then, the interpolation theory is introduced to compensate the non-effective pixel. The approach proposed solves the difficulty of the non-effective pixels detection and compensation efficiently. For a  $320 \times 240$  UFPA, the algorithm has been realized on an infrared image processing system based on FPGA and the effect of non-effective pixel on the imaging system is eliminated successfully.

**Key words** un-cooled infrared focal plane array; non-effective pixels; cycling of iteration; real-time compensation

## 1 引 言

随着非制冷型焦平面阵列(UFPA)在国防、电

力、消防、石化以及医疗等领域的应用越来越广泛,人们对其成像质量的要求也越来越高。但受半导体

**基金项目**: 国家自然科学基金创新群体基金(60721001)资助课题。

**作者简介**: 涂 霞(1984—),女,硕士研究生,主要从事光电传感器信号检测和应用等方面的研究。

E-mail: tusixia@163.com

**导师简介**: 蒋亚东(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光电薄膜与集成器件、有机电子材料及器件、敏感材料及传感器、光电材料及器件等方面的研究。E-mail: Jiangyd@uestc.edu.cn

材料的不均匀性、掩膜误差、缺陷、工艺等因素的影响,其视频输出幅度会出现不均匀现象,不均匀的极端情况就是无效像元。无效像元的数量及其分布对器件性能的影响很大,使得红外输出图像出现亮点和暗点<sup>[1,2]</sup>。另外,无效像元的存在对非均匀性校正,图像增强等处理的资源开销及实现效果也有很大影响。因此在图像的预处理阶段对 UFPA 中的无效像元进行识别和补偿,对提高红外成像系统的性能具有重要意义。

目前,常用的无效像元判别算法有响应率检测法、偏差检测法和噪声检测法<sup>[3]</sup>。响应率检测法、偏差检测法及其派生算法的判别阈值是依靠实验数据的经验值来确定的,使得这些算法的无效像元判断缺乏通用性。噪声检测法及其派生算法<sup>[4]</sup>根据统计方法获取到的数据特征来识别无效像元,常用的统计方法有主成份分析法<sup>[5]</sup>和  $3\delta$  原则<sup>[6]</sup>。由于这些算法假设焦平面是各像元不相关且响应符合正态分布的理想器件,并需要获得大量数据,因此将其用于实际检测较为困难。无效像元的硬件实时补偿多采用现场可编程门阵列(FPGA)加数字信号处理器(DSP)结构<sup>[7]</sup>,利用 DSP 的高速数据处理能力来实现无效像元的补偿,FPGA 只进行简单的时序控制。FPGA 日益增强的数据处理能力使得采用 FPGA 实现无效像元的实时补偿成为可能。这一结构大大降低了系统成本和功耗,便于系统小型化。本文提出了一种使用

循环迭代搜索最优识别阈值的无效像元识别算法,并在 FPGA 上实现了无效像元的实时补偿。

## 2 无效像元的识别

### 2.1 相关定义

#### 2.1.1 像元响应率

假设探测器为  $M \times N$  的红外焦平面(IRFPA)阵列,像元响应率  $R(i, j)$  定义为 IRFPA 在一定帧周期和一定动态范围条件下,像元对每单位辐照功率产生的输出信号电压

$$R(i, j) = V_s(i, j)/P, \quad (1)$$

式中  $i = 1 \sim M, j = 1 \sim N, V_s(i, j)$  为第  $(i, j)$  像元对应于辐照功率  $P$  的响应电压,  $P$  为第  $(i, j)$  像元所接收的辐照功率<sup>[8]</sup>。

#### 2.1.2 平均响应率

IRFPA 各有效像元响应率的平均值定义为

$$\bar{R} = \frac{1}{M \times N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R(i, j), \quad (2)$$

式中  $M$  和  $N$  分别为 IRFPA 像元的行数和列数;  $d$  和  $h$  分别为死像元数和过热像元数。实际测量中,  $d$  和  $h$  为经多次迭代计算得到<sup>[8]</sup>。

#### 2.1.3 响应率不均匀性

响应率不均匀性定义为焦平面各有效像元响应率  $R(i, j)$  均方根偏差与平均响应率  $\bar{R}$  的百分比

$$U_R = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i, j) - \bar{R}]^2} \times 100\%, \quad (3)$$

#### 2.1.4 无效像元

无效像元包括死像元和过热像元。按 IRFPA 器件对黑体辐射的响应程度作为量化指标,死像元指像元响应率小于平均响应率的  $1/10$  的像元;而过热像元就是像元噪声电压大于平均噪声电压 10 倍的像元。

### 2.2 非均匀性校正

针对红外图像非均匀性的处理方法有基于黑体的标定类算法和基于干扰抵消原理的自适应算法。前者是最直接、最基本的非均匀性校正技术,在 IRFPA 成像系统中被广泛应用。这种方法原理简洁,易于硬件实现,对目标特性没有任何要求,是公认的 IRFPA 系统评估手段<sup>[9]</sup>。选取两个不同的辐射水平  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  作为校正点,假设探测器阵列为  $M \times N$ ,分别测出探测器各单元的响应  $S_{ij}(\varphi_1)$  和

$S_{ij}(\varphi_2)$ , 则有

$$\bar{S}_1 = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(\varphi_1), \quad (4)$$

$$\bar{S}_2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S_{ij}(\varphi_2), \quad (5)$$

$$G_{ij} = \frac{\bar{S}_2 - \bar{S}_1}{S_{ij}(\varphi_2) - S_{ij}(\varphi_1)}, \quad (6)$$

$$O_{ij} = \bar{S}_1 - \frac{(\bar{S}_2 - \bar{S}_1)S_{ij}(\varphi_1)}{S_{ij}(\varphi_2) - S_{ij}(\varphi_1)}, \quad (7)$$

其中  $G_{ij}, O_{ij}$  分别为两点校正算法的校正增益和校正偏移量。

### 2.3 循环迭代变长搜索无效像元

面阵型焦平面的失效元检测常用响应率检测法。响应率(即增益)是失效元检测的首选判断条件。检测原理如下:根据实际经验确定一个阈值

(threshold1), 如果非均匀校正的增益系数  $gain1 < 1 - threshold1$  或  $gain1 > 1 + threshold1$ , 就判定对应的探测单元为失效元, 否则认为是有效元<sup>[10]</sup>。阈值是判别无效像元的关键, 靠经验确定阈值的算法较为主观且不具有通用性。本文在分析红外焦平面阵列特征的基础上提出了用循环迭代法搜索最优阈值, 从而有效地识别无效像元。根据 UFPA 在辐射度  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  下的响应输出值  $S_{ij}(\varphi_1), S_{ij}(\varphi_2), S_{ij}(\varphi_3)$  搜索无效像元识别阈值, 标识出无效像元在 UFPA 上的位置, 具体算法如下:

- 1) 根据  $S_{ij}(\varphi_1), S_{ij}(\varphi_2)$  计算非均匀性校正的增益系数 gain。
- 2) 初始化阈值 threshold 为 1。
- 3) 统计  $S_{ij}(\varphi_3)$  的最小值 min 及平均值  $a$ , 如果  $min < 0.1 \times a$  执行步骤 4, 否则执行步骤 6。
- 4) 记录  $gain < 1 - threshold$  或  $gain > 1 + threshold$  的像元的位置及无效像元的总数  $k$ 。用四邻域插值法替换这些像元, 更新  $S_{ij}(\varphi_1), S_{ij}(\varphi_2), S_{ij}(\varphi_3)$  的数据。

$$S_{ij} = \frac{S_{i-1,j} + S_{i+1,j} + S_{i,j-1} + S_{i,j+1}}{4}, \quad (8)$$

- 5) 修改阈值  $threshold = threshold - \frac{threshold}{b \times k + c}$ ,  $b, c$  为正实数, 重新计算非均匀性校正的增益系数 gain, 转入步骤 3。
- 6) 结束循环。

为避免偶然误差导致的无效像元误判, 响应输出值  $S_{ij}(\varphi_1), S_{ij}(\varphi_2), S_{ij}(\varphi_3)$  均为系统稳定工作后  $N$  帧数据的统计平均值。本算法采用了变长搜索, 即迭代步长随着无效像元数目的增加逐渐减小, 迭代初期的大步长使得程序有较快的收敛速度, 迭代后期的小步长使得最优阈值的搜索更为精确, 从而保证高效、精确地判断无效像元。

### 3 无效像元的实时补偿

由图像信息理论可知, 相邻两点或两帧之间的图像数据具有极高的相关性。根据插值理论, 对于连续变化的函数, 某点的数值可以通过该点周围两点或多点数值进行插值预测。因此, 在 FPGA 上可采用同帧行列间内插的方式实现无效像元实时补偿。硬件原理图如图 1 所示。

首先将识别阶段标识的无效像元位置固化到外部存储器(如 FLASH); 在图像数据采集过程中, 当前数据是否需要补偿由外部存储器相应的标识信息

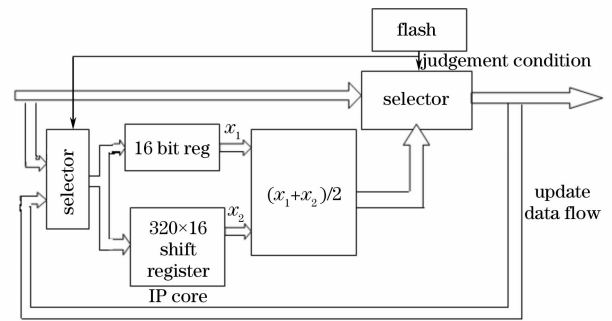


图 1 无效像元补偿的 FPGA 实现

Fig. 1 Compensation of the non-effective pixels on FPGA 决定。无效像元实时补偿的实现步骤如下: 对于  $M \times N$  的 UFPA 器件, 在任意采样时刻, 利用长度为  $N$  的移位寄存器保存当前采样点之前的  $N$  个数据, 使其输出始终为与采样点同列的上一个数据; 同时用一个普通寄存器暂存采样数据, 使得普通寄存器的输出始终为采用点的前一个数据。在数据流传输过程中同步的读取 FLASH 中的无效像元标识信息, 如果出现无效像元则用普通寄存器与移位寄存器输出数据的平均值替换无效像元的值, 同时更新普通寄存器与移位寄存器的输入数据, 使补偿后的数据同步到普通寄存器与移位寄存器中, 实现对连续无效像元和大面积无效像元的实时补偿。

### 4 实验结果分析

针对  $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$  的 UFPA 器件, 用循环迭代法识别出了无效像元的位置, 在 FPGA 上使用移位寄存器实现了无效像元的实时补偿。UFPA 输出的原始图像数据经处理后的效果如图 2 所示。由图 2(a) 可以看出, UFPA 输出的原始图像质量很差, 图中存在大量的亮点和暗点, 非均匀性也很明显, 有效的图像信息被淹没在噪声中。图 2(b) 是应用本文所提方法对图 2(a) 进行无效像元检测及补偿处理后的图像。可见, 原始图像中的坏点得到了有效补偿, 图像质量有了明显改善。同时, 无效像元的成功补偿也有利于非均匀性校正及图像增强处理的实现。图 2(c), 图 2(d) 分别是对图 2(b) 进行非均匀性校正和基于灰度冗余的直方图变换处理后的图像。综合以上分析, 本文提出的算法对 UFPA 中的无效像元进行了有效的识别与补偿, 成功地消除了无效像元对后续图像处理的影响。

表 1 显示了无效像元识别过程中的迭代次数、迭代步长以及阈值。从该表中可以看出迭代初期阈值很大, 绝大多数像元被认为是有效像元; 随着迭代

的深入,更多的无效像元被识别,阈值逐渐缩小,迭代步长随之逐渐减小,最终二者趋于稳定。最初的高阈值和大步长使得迭代过程迅速收敛,而逐渐减小的阈值与步长保证了判别的精度。初始阈值为

0.990,步长为 0.01,迭代结束时阈值为 0.9599,步长为 0.0021,二者在最后几次迭代过程中的数值都较为稳定。由此可见,这种算法在保证识别精度的同时极大地提高了运行速度。

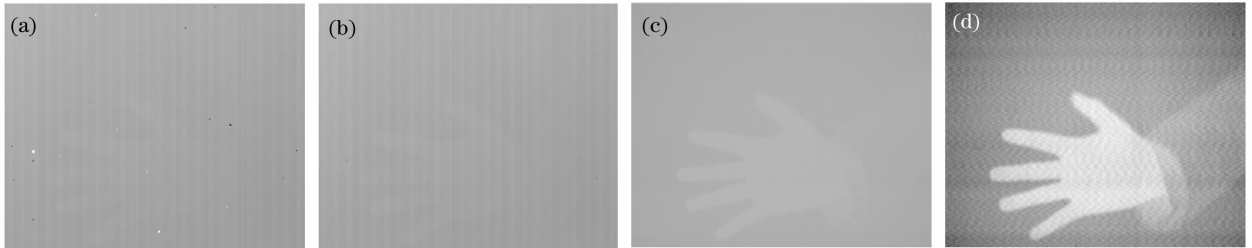


图 2 320×240 UFPA 无效像元补偿效果图。(a)原始图像;(b)无效像元补偿的图像;(c)非均匀性校正后的图像;(d)直方图变换处理后的图像

Fig. 2 Effect of non-effective pixels compensation to 320×240 URFPFA imaging. (a) Original image; (b) image after non-effective pixels compensation; (c) image after non-uniformity correction; (d) image after histogram equalization

表 1 无效像元识别过程中相关迭代数据

Table 1 Iteration data in the process of the non-effective pixels detection

Iteration number	Step size	Threshold	Non-effective pixels number
1	0.0100	0.9900	23
2	0.0030	0.9870	27
3	0.0027	0.9843	30
4	0.0025	0.9818	33
5	0.0023	0.9795	33
6	0.0023	0.9772	34
7	0.0022	0.9750	34
8	0.0022	0.9728	34
9	0.0022	0.9706	35
10	0.0022	0.9684	35
11	0.0022	0.9662	35
12	0.0021	0.9641	35
13	0.0021	0.9620	35
14	0.0021	0.9599	36

## 5 结 论

提出了一种用循环迭代法变长搜索最优阈值的无效像元识别算法,并给出了在 FPGA 上实时补偿无效像元的实现方案。实验结果表明:循环迭代变长搜索方法有效地解决了无效像元识别阈值选取困难的问题,无效像元实时补偿的硬件设计方案充分利用了 FPGA 的资源,简化了系统结构。本文所提方法在非制冷红外焦平面图像的预处理阶段取得了令人满意的效果,同时大大降低系统成本和功耗,便于系统的小型化。

## 参 考 文 献

- Scribner D A, Krueer M R, Gridley C J. Measurement, characterization and modeling of noise in staring infrared focal plane array[C]. *Proc. SPIE*, 1987, **782**: 147~160
- Boltar K O, Bovina L A, Saginov L D *et al.*. IR imager based on a 128 × 128 HgCdTe staring focal arrays[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3819**: 92~95
- Guo Jichang, Chen Minjun, Li Qiang *et al.*. Hardware and software design for invalid pixels processing of infrared focal plane array detectors[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(6): 57~60  
郭继昌,陈敏俊,李 锵等. 红外焦平面失效元处理方法及软硬件实现[J]. *光电工程*, 2006, **33**(6): 57~60
- Li Yanjun, Cui Ruiqing, Zhao Guifang *et al.*. A new method of bad pixel detection and compensation of IRFPFA [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(1): 51~53  
李言俊,崔瑞青,赵桂芳等. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测方法[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(1): 51~53
- José Manuel, Lopez Alonso, Javier Alda. Principal component analysis of noise in an image-acquisition system. Bad pixel extraction[J]. *SPIE*, 2003, **5036**: 353~357
- Zhang Ke, Zhao Guifang, Cui Ruqing *et al.*. Method of improving bad pixel detection precision of IRFPFA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(4): 453~456  
张 科,赵桂芳,崔瑞青等. 一种提高红外焦平面阵列盲元检测精度的方法[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(4): 453~456
- Fan Xintian. Distortion Correction and Dead Pixels Compensation of Un-cooled IRFPFA Imaging System [D] Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004~2005  
范心田. 非制冷红外焦平面成像系统畸变校正及盲元补偿[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004~2005
- The technical norms for measurement and test of characteristic parameters of infrared focal plane arrays[S]. GB/T17444-1998. 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S]. GB/T17444-1998
- D L Perry. 2-D; a new focal plane array figure of merit [C]. *SPIE*, 1992, **1762**: 308~312
- Zhou Huixin, Yin Shimin, Liu Shangqiang *et al.*. Algorithm of blind pixels auto-searching and compensation for IRFPFA[C]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 598~600  
周慧鑫,殷世民,刘上乾等. 红外焦平面器件盲元检测及补偿算法[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5): 598~600