

针对 BIB 探测器红外图像盲元检测及补偿

鲁斌^{1,2}, 彭肃家², 王晓东^{2*}, 杜伟杰¹, 董祚汝^{2*}, 汪泽文^{2*}, 郭小庆², 陈栋²

(1. 上海师范大学 数理学院, 上海 200233;

2. 中国电子科技集团公司第五十研究所 太赫兹技术创新中心, 上海 200331)

摘要: 受材料和工艺等影响, 红外图像普遍存在盲元问题。针对新型阻挡杂质带(BIB)探测器的红外图像, 还存在像素少、非均匀性大等问题, 常规盲元检测和补偿方法在 BIB 探测图像不完全适用。为解决这一问题, 列举了常见红外图像盲元检测及补偿方法的优缺点, 并逐一对照实测 BIB 图像进行了实验处理, 盲元分布均匀性较差, 块状盲元占比较高。因此, 提出了改进的盲元检测方法和盲元补偿法, 并采用基于 FPGA 的硬件系统平台对算法进行了实现。经过分析, 改进后盲元分布均匀性和块状盲元占比指标得到优化, 其应用的经济性也获得切实改善。

关键词: BIB 探测器; 红外图像; 盲元检测; 盲元补偿; FPGA

中图分类号: TN219

文献标识码: A

Blind detection and compensation for BIB detector infrared images

LU Bin^{1,2}, PENG Su-Jia², WANG Xiao-Dong^{2*}, DU Wei-Jie¹, DONG Zuo-Ru^{2*}, WANG Ze-Wen^{2*},
GUO Xiao-Qing², CHEN Dong²

(1. Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China;

2. Terahertz Technology Innovation Center, The fiftieth Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shanghai 200331, China)

Abstract: Due to the influence of materials and processes, infrared images generally suffer from the problem of blind pixels. For infrared images from new Blocked Impurity Band (BIB) detectors, there are still issues such as limited pixels and significant non-uniformity. Conventional blind pixel detection and compensation methods are not fully applicable to BIB detection images. To address this issue, this paper enumerates the pros and cons of common methods for detecting and compensating blind pixels in infrared images, and conducts experimental processing on actual measured BIB images one by one. However, the results indicate that the distribution of blind pixels is highly non-uniform, with a relatively high proportion of clustered blind pixels. Therefore, this paper proposes an improved blind detection method and blind compensation method, and implements the algorithms using an FPGA-based hardware system platform. The analysis shows that the the uniformity of blind pixel distribution and the proportion of clustered blind pixels have been optimized after the improvement, leading to a tangible enhancement in its economic viability for application.

Key words: BIB Detector, infrared images, blind detection, blind compensation, FPGA

PACS:

引言

红外线自 1800 年被发现以来, 从军事领域, 扩展至智慧城市、公共安全等民用领域得到广泛的应

用。红外焦平面探测器作为红外技术的核心器件发展迅速^[1]。然而, 由于器件制作过程中存在材料差异、掩膜误差、工艺不稳定等因素^[2], 探测器不同像元会存在缺陷及响应率差异, 分别对应红外图像

收稿日期: 2025-11-06, Received date: 2025-11-06,

基金项目: 国家自然科学基金项目(62171286, 62301321); 上海市扬帆计划(23YF1444300, 22YF1446200, 22YF1446300); 上海市优秀学术/技术带头人计划(21XD1423600)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62171286, 62301321); the Shanghai Sailing Program (23YF1444300, 22YF1446200, 22YF1446300); Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader(21XD1423600).

作者简介(Biography): 鲁斌(1990-), 男, 湖北潜江人, 高级工程师, 博士学位, 主要研究领域为 BIB 成像、图像处理和信号处理. E-mail: bigbigwolf513@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): WANG Xiao-Dong, E-mail: wxd06296@163.com; DONG Zuo-Ru, E-mail: zrdong2021@163.com; WANG Ze-Wen, E-mail: hit_zzw@163.com.

的盲元和非均匀性问题,这是影响红外成像质量包括成像对比度、目标识别准确率等的重要因素。

红外辐射根据波长可划分为近红外、中红外和远红外。波长在 30~1000 μm 的红外波段,称远红外,特点是波长更长,能量较低,热辐射特性特征明显,易被大气中水、二氧化碳吸收。阻挡杂质带(BIB)探测器^[3]是一种具有独特优势的中远红外探测器,主要体现在高量子效率、长积分时间、低读出噪声、抗辐射能力强、像元可操作性好等方面,能够探测的波长范围广泛,通常覆盖 5~300 μm 。由于在制造过程中材料和工艺加工精度影响^{[17][18][19]},红外探测器各个传感单元呈现不同的响应误差,被称为盲元。盲元对目标成像和识别准确度影响巨大。然而,由于发展起步晚,国内 BIB 探测器的像元规模目前只到 128 \times 128 像元^[4]。相较于中波和短波红外探测器,发展较为缓慢,像元数量远小于短波红外探测器的百万像素规模,因此,基于**大数据量**的常规的红外图像盲元检测和补偿方法不再适用于 BIB 探测图像,处理效果较差。

BIB 探测器的盲元相较于其它红外探测器(如 HgCdTe、InSb、QWIP 等)主要有以下几个区别,一是 BIB 探测器盲元成因多是杂质带不均匀、本征层缺陷、极低温操作不稳定,其它红外探测器多是材料不均匀、二极管工艺误差导致;二是 BIB 探测器在盲元表现上响应率极低,暗电流仍受控,其它红外探测器是高暗电流、高噪声或非线性响应;三是 BIB 探测器盲元检测条件是极低温 4K 左右、低背景辐射,而其它红外探测器则是相对较高温度,如 77K,常规的光照条件。BIB 探测器因其独特的阻挡层结构,暗电流极低,适合极微弱信号检测,也使得盲元受材料微观缺陷影响,而其它红外探测器的盲元往往与电学特性关联更紧密。

在 BIB 焦平面探测器采用一点定标法等常规盲元检测法^{[5][6]}后,存在两方面的问题,一是**盲元空间分布均匀性较差**,二是**块状盲元占比过多**。而盲元空间分布均匀性较差在实际工程应用中会带来图像局部失真、信噪比下降及目标检测与识别精度下降等后果^[7],块状盲元占比过多会显著破坏图像的空间连续性与完整性,导致目标识别和特征提取等后续处理精度下降。

部分盲元检测算法对区域性噪声易误判或对像素空间相关性的过度敏感^[8],是造成块状盲元占比过多问题的主要原因,与算法选择强相关;部分

盲元检测法过度依赖固定假设而弱化了场景的匹配性、为追求效率而采用固化参数组合并未提供动态调节接口,与算法选择强相关。这两类问题可通过盲元检测算法合理选择来解决。

常规的双参考源盲元检测法,基于正常像元对双源响应成线性相关,而盲元响应因响应缺陷会显著偏离该规律。由于 BIB 探测器在制备的过程中,材料缺陷、工艺偏差和集成应力等因素,导致部分像元成为盲元。但 BIB 探测器相较于其它红外波段探测器,具有高响应率的特点,单像元的响应率存在较大差异,可以针对不同参考源选取不同的阈值判断盲元,从而解决盲元空间分布均匀性较差的问题。

在基于计算机软件的实现方案中,盲元检测与补偿算法受限于其串行执行架构及系统调度,会引入显著的帧处理延迟,难以满足红外成像对实时性的严苛要求。同时,计算机端软件处理依赖通用操作系统及处理器,需占用大量计算资源和总线资源,系统功耗高,可靠性下降,可能成为高分辨率高帧率数据处理瓶颈。相较之下,采用 FPGA 端实现则可利用流水线和并行处理的优势,减少处理延时,降低功耗,提高可靠性。

针对 BIB 焦平面阵列探测器中盲元导致的芯片流片良率低问题,提出基于双参考源的改进型恒定盲元检测法、基于窗口次极值判别的改进型闪烁盲元检测与改进型中值滤波盲元补偿方法。该方法通过优化盲元识别算法,结合探测器响应率特性,实现盲元的精准定位与分类;在补偿策略上采用分类补偿的方法,有效利用盲元周围像素信息。改进后的恒定盲元检测法盲元空间分布均匀性指数指标最优,块状盲元占比指标最优;改进后的闪烁盲元检测法在盲元检测数量上有了较大提升;改进后的盲元补偿方法简化了计算流程,计算复杂度适中,无特殊运算。实验结果表明,新方法解决了传统方法因补偿方法导致的良率瓶颈,使原本因盲元问题无法通过测试的芯片满足实用要求,为高分辨率 BIB 焦平面阵列探测器的批量生产提供了良好的技术支撑。

1 盲元检测及补偿基本理论

1.1 盲元检测与改进

红外焦平面探测器件的盲元,根据性质不同,可分为恒定盲元和闪烁盲元两种类别。恒定盲元对黑体响应始终异常,且不随时间变化,图像中表

现为“亮点”或“暗点”,闪烁盲元具有随机性,时而表现为盲元,时而表现正常,灰度值较分散,在多帧间波动明显。

1.1.1 常规恒定盲元检测

常规的盲元检测方法主要针对恒定盲元进行检测,包括一点定标法、基于双参考源盲元检测法、基于背景预测的盲元检测法、基于梯度的盲元检测法、基于滑动窗口的盲元检测法和局部 3σ 盲元检测法等。

一点定标法的计算方法在于死像元和过热像元的计算,具体如下^[16]:

$$P_b = 1 - N_{ef} = \frac{d + h}{M \cdot N} \times 100\%, \quad (1)$$

式(1)中 P_b 为盲元率, N_{ef} 为有效像元率, d 和 h 分别为死像元和过热像元, M 和 N 分别为焦平面的行数和列数。符合不等式 $R(i, j) - \frac{1}{2}\bar{R} < 0$ 为死像元 d ,符合不等式 $V_N(i, j) - 2\bar{V}_N > 0$ 的像元为过热像元 h , R 为响应率, \bar{R} 为平均响应率, V_N 为噪声电压, \bar{V}_N 为平均噪声电压。

双参考源盲元检测法的通过引入两个已知辐

$$\max \begin{pmatrix} |I(i, j) - I(i, j - 1)| + |I(i, j) - I(i, j + 1)| \\ |I(i, j) - I(i - 1, j)| + |I(i, j) - I(i + 1, j)| \\ |I(i, j) - I(i - 1, j - 1)| + |I(i, j) - I(i + 1, j + 1)| \\ |I(i, j) - I(i - 1, j + 1)| + |I(i, j) - I(i + 1, j - 1)| \end{pmatrix} > K \cdot \sigma_n, \quad (4)$$

符合式(4)判定为盲元, $\max()$ 为取最大值函数, K 为常数因子, σ_n 为图像的噪声标准差。

基于滑动窗口的盲元检测法,利用正常像素灰度值与周围局部邻域内像素的灰度值高度相关,显著偏离则判定为盲元,具体公式如下:

$$|I(i, j) - \hat{I}_{\text{median}}| > K \cdot \tilde{\sigma}_{\text{local}}, \quad (5)$$

符合式(5)判定为盲元, \hat{I}_{median} 为邻域背景值(通常使用中值), K 为常数因子, $\tilde{\sigma}_{\text{local}}$ 为标准差。

局部 3σ 盲元检测法在一个局部滑动窗口内,假设正常像素的灰度值服从正态分布,那么偏离均值超过3倍标准差的值可视为盲元。具体公式如下:

$$\left| I(i, j) - \left(\frac{1}{N} \sum_{(m, n) \in \Omega} I(m, n) \right) \right| > K \cdot \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{(m, n) \in \Omega} (I(m, n) - \mu_{\text{local}})^2}, \quad (6)$$

符合式(6)判定为盲元, N 为滑动窗口中像素的个数, Ω 为排除了 (i, j) 本身的领域窗口, μ_{local} 为局部

射特性的参考源(通常为高低温黑体),计算红外探测器各像元的响应率偏移程度,进而判定为盲元,具体公式如下^[16]:

$$R(i, j) = \left| \frac{V_2(i, j) - V_1(i, j)}{T_2 - T_1} - \bar{R} \right| > K \cdot \sigma_R, \quad (2)$$

符合式(2)判定为盲元, $V_1(i, j)$ 和 $V_2(i, j)$ 分别为参考源温度 T_1 和 T_2 下的输出信号值, \bar{R} 为所有像元的平均响应率, K 为预设的判定系数, σ_R 为所有像元响应率的标准差。

基于背景预测的盲元检测法利用盲元周围的有效像素来预测盲元点本该有的正常值,预测值与实际值进行对比,如果差异显著则判定为盲元。具体公式如下:

$$|I(i, j) - \text{predict}(I(m, n) | m, n \in \Omega)| > K \cdot \sigma_n, \quad (3)$$

符合式(3)判定为盲元, $\text{predict}()$ 为背景预测函数, Ω 为排除了 (i, j) 本身的领域窗口, K 为常数因子, σ_n 为图像的噪声标准差。

基于梯度的盲元检测法通过计算像素在各个方向上的梯度,并与正常梯度阈值进行比较,异常点即为盲元。具体公式如下^[11]:

均值, K 为常数因子(通常为3)。

1.1.2 基于双参考源的改进型恒定盲元检测法

常规的双参考源盲元检测法,基于正常像元对双源响应成线性相关,而盲元响应因响应缺陷会显著偏离该规律。由于BIB探测器在制备的过程中,材料缺陷、工艺偏差和集成应力等因素,导致部分像元成为盲元。但BIB探测器相较于其它红外波段探测器,具有高响应率的特点,单像元的响应率存在较大差异。如果要解决盲元空间分布均匀性较差的问题,可以针对不同参考源选取不同的阈值判断盲元。

对于盲元空间分布均匀性较差的问题,盲元与探测器固有的响应非均匀性在空间上混杂,且易于不完美的参考辐射场不均匀耦合,单参考源无法区分“信号低是源于盲元还是源于低辐射输入或低固有响应”,需要一个能够将“像元自身响应特性”与“外部辐射输入”解耦的方法,双参考源通过引入一

个已知的辐射差,构建了一个方程组,能够计算出每个像元与辐射输入无关的相对响应率。

本文提出了基于双参考源的改进型盲元检测方法和基于中值滤波的改进型闪烁盲元检测方法。

以基于双参考源盲元检测法作为基础,根据 BIB 探测器与温度波动相关性,结合不同温度参考源对盲元检测法进行改进,具体如下:

(1) 将高温参考源下采集的图像减去低温参考源下采集的图像得到一幅图像像元的响应差值图像 $V_{diff}(i,j)$;

$$V_{diff}(i,j) = V(T_{high},i,j) - V(T_{low},i,j), \quad (7)$$

在式(7)中, T_{high} 和 T_{low} 分别代表双参考源的高温 and 低温温度值。

(2) 对响应差值图像进行中值滤波运算,滤波处理完成后得到滤波图像 $V_{diff_med}(i,j)$,通过图像滤波操作剔除了图像中的盲元信息;

$$V_{diff_med}(i,j) = \text{median}(V_{diff}(i,j)), \quad (8)$$

(3) 使用响应差值图像减去对应滤波图像得到评估图像 $V_{assess}(i,j)$;

$$V_{assess}(i,j) = V_{diff}(i,j) - V_{diff_med}(i,j), \quad (9)$$

(4) 评估图像归一化后,再根据探测器响应灵敏度分为强响应和弱响应两种情况,强弱响应下检测系数有差异,计算得到盲元位置 $\text{loc}(i,j)$ 。

$$\begin{aligned} & \text{if } V_{diff_med}(i,j) < \text{para_resp_thres} \\ & \text{loc}(i,j) = \begin{cases} 1, V_{assess}(i,j) \notin [\text{para_low1}, \text{para_high1}] \\ 0, V_{assess}(i,j) \in [\text{para_low1}, \text{para_high1}] \end{cases} \\ & \text{else} \\ & \text{loc}(i,j) = \begin{cases} 1, V_{assess}(i,j) \notin [\text{para_low2}, \text{para_high2}] \\ 0, V_{assess}(i,j) \in [\text{para_low2}, \text{para_high2}] \end{cases} \end{aligned}, \quad (10)$$

在式(10)中, para_low1 和 para_high1 为弱响应下评估图像的 V_{assess} 设定的上下限,超过上下限则判定为盲元, para_low2 和 para_high2 为强响应下评估图像的 V_{assess} 设定的上下限,超过上下限则判定为盲元。

1.1.3 常规的闪烁盲元检测

BIB 探测器需在极低温下工作,温度波动会显著影响杂质电离效率,部分盲元会随温度变化“激活”或“消失”,这部分像元被称为 BIB 闪元。常规的闪烁盲元检测方法,通常通过分析像素灰度的时间序列特性来识别异常。具体公式如下:

$$\sqrt{\frac{1}{F-1} \sum_{t=1}^F (x_t - \mu_{temp})^2} > K \cdot \text{median}(\{\sigma_{temp}(i,j) | V_{i,j}\}), \quad (11)$$

符合式(11)的为闪烁盲元,其中 F 为时间序列长度, x_t 表示该像素在第 t 帧图像中的灰度值, μ_{temp} 为平均响应水平, σ_{temp} 为标准差, K 为常数因子。

1.1.4 基于窗口次极值判别的改进型闪烁盲元检测

常规的闪烁盲元检测方法,在一个窗口内检测极值的方法并不能完全检测出闪元,比如同时出现 2 个暗点或者亮点时就会无法检出现象。

如果一个像元频繁闪烁但每次幅度都不是最大或最小,同时检测结果过于依赖是否捕捉到“单次最强闪烁”,偶然性大,可靠性低。在比较两个随机变量序列的高阶次序统计量时,闪烁盲元的各阶次序统计量的期望都高于正常像元。

因此,提出一种改进的闪烁盲元检测方法如下:

对实时成像数据,设定 3×3 窗口,中心像元为 $P(i,j)$,对窗口内数据进行排序,排序后数据为 $S = [V_1, V_2, \dots, V_9]$,判定闪烁盲元计算如下:

$$\begin{aligned} & P(i,j) - V_8 \geq \text{rate} \\ & \text{or } P(i,j) - V_2 \leq \text{rate} \end{aligned}, \quad (12)$$

符合不等式的为闪烁盲元,其中 V_2 为窗口内次小值, V_8 为窗口内次大值, rate 为常数因子。

1.2 盲元补偿与改进

1.2.1 常规盲元补偿方法

由于红外焦平面阵列(IRFPA)中相邻像元接收的红外辐射信号通常具有较强的空间连续性^[9]。盲元的真实响应值可以通过邻域内正常像元的灰度信息进行估计和恢复,以消除盲元对图像质量的干扰^[10],为后续的图像分析和处理提供可靠数据^[11]。

对于盲元补偿,常规算法有基于边缘信息的均值滤波,阿尔法均值滤波算法,中值滤波算法,背景预测算法^[12]。

基于边缘信息的均值滤波的计算公式如下:

$$R_p(i,j) = \frac{1}{n \times m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_{ij} \times E_{ij} \times \text{bpx}_{ij}), \quad (13)$$

式(13)中, E_{ij} 为边缘图像, bpx_{ij} 为盲元图像, x_{ij} 为盲元波段信息, $R_p(i,j)$ 为补偿后图像数据。

阿尔法均值滤波算法的计算公式如下:

$$H(i,j) = \frac{1}{(2n+1)^2 - d} \sum g(s,t), \quad (14)$$

式(14)中,窗口像元按从大到小排序, d 为去掉窗口排序中最大最小各 $d/2$ 个像元,去掉潜在盲元将剩余像元集合记为 W_0 , $g(s,t)$ 为中 W_0 中像元点的灰度值, $H(i,j)$ 为阿尔法滤波值。

中值滤波算法的计算公式如下:

$$g(x,y) = \text{median}\{f(s,t)|(s,t) \in W_{xy}\}, \quad (15)$$

式(15)中, $\text{median}()$ 表示中值处理, W_{xy} 表示以 (x,y) 为中心的 3×3 邻域窗口, $g(x,y)$ 为滤波后图像数据。

背景预测算法的计算公式如下:

$$B(x,y,t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-N+1}^t I(x,y,i), \quad (16)$$

式(16)中, $B(x,y,t)$ 为 t 时刻 (x,y) 位置的预测背景值, N 为滑动窗口大小, $I(x,y,i)$ 为 i 时刻 (x,y) 位置的原始图像数据值。

1.2.2 改进型中值滤波盲元补偿方法

在通过改进型恒定盲元与闪烁盲元检测法确定盲元位置后,本方法采用中值滤波对盲元进行空间修复。具体而言,我们以一个 3×3 的滑动窗口 $f(s,t)$ (该尺寸为奇数,符合中值滤波要求且适用于 BIB 焦平面)遍历图像。对于当前窗口,算法首先剔除其中所有已被标记为盲元的像素数据,继而仅基于剩余的有效邻域像素构建中值滤波的候选像素集。

单点有丰富可信的邻域信息,块状只有有限残缺的边界信息。由于信息基础不同,没有一种算法能同时在“利用完整邻域修复单点”和“从有限边界推断大块任务”两个任务中都达到最优。单点盲元补偿算法选择不当可能会模糊细节,但这种误差是局部的、有限的,而块状盲元补偿算法选择不当会使一片区域模糊,这种误差是区域性的,危害更大。

基于以上分析,单点与块状的盲元补偿策略需进行差异化设计,以便平衡最大化利用邻域信息和最小化误差,同时,为加快盲元补偿处理,采用硬件流水线的方式实现盲元的实时补偿。

当盲元数量=1个时,窗口内剩余有效数据 $f_{\text{valid}}(s,t)$ 中值滤波输出 $g(x,y)$,即为盲元补偿结果。

$$g(x,y) = \text{median}\{f_{\text{valid}}(s,t)|(s,t) \in W_{xy}\}, \quad (17)$$

式(17)中, W_{xy} 表示以 (x,y) 为中心的 3×3 邻域窗口。

当盲元数量 ≥ 2 个时,窗口内剩余有效数据按照位置权重进行重复扩展,位置权重如下:

$$\text{weigh} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 3 & 0 & 3 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

将重复扩展后的数据 fw_{valid} 转换为单列数据 $fw_{\text{col_valid}}$,加权平均后输出 $g(x,y)$,即为盲元补偿结果。

$$g(x,y) = \text{median}\{fw_{\text{col_valid}}(s,t)|(s,t) \in WV_{xy}\}, \quad (19)$$

式(19)中, WV_{xy} 表示以 (x,y) 为中心的 3×3 邻域窗口加权后转为单列数据。

2 盲元检测及补偿设计

2.1 流程设计

采用低温杜瓦光学成像系统,对中国电子科技集团公司第五十研究所研制的 128×128 元 BIB 探测器进行成像测试,成像系统结构示意图如图 1。

采用真空泵对杜瓦抽真空后^[13],使用 GM 制冷机对杜瓦系统进行二级制冷,探测器端工作在 4K 温区,机械结构工作在 70K 温区。温控仪负责探测器

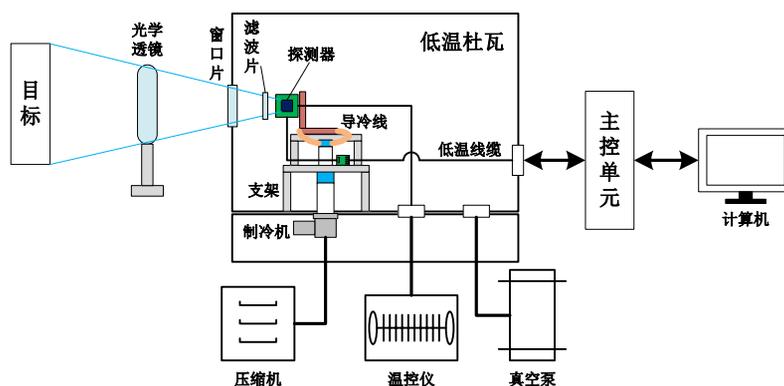


图 1 成像系统结构

工作在恒定低温。室温目标在光学焦距位置处放置完成后,目标太赫兹辐射经过光学透镜达到窗口片,窗口片选用KRS-5材质,选通1-40 μm 波段,再经过滤波片后到达探测器进行成像。探测器通过接口板和低温线缆将成像数据传输到主控单元,最后通过计算机显示器端进行显示。

实验系统的搭建与工作流程方面,先使用真空泵对杜瓦抽真空以隔绝热对流^[13]。随后,利用GM制冷机进行二级制冷,使探测器端工作在4K温区,机械结构(如冷屏)冷却至70K温区。温控仪则用于维持探测器工作在恒定的低温状态。

在光路方面,将室温目标置于光学系统的焦平面位置。目标的太赫兹辐射经光学透镜会聚后,依次透过KRS-5材质的窗口片(其透射波段为1-40 μm)与特定滤波片,最终到达探测器完成信号接收。

在信号处理方面,探测器将产生的成像数据通过接口板与低温线缆传输至主控单元,最终由计算机进行数据处理与图像显示。

2.2 算法设计

盲元检测包含恒定盲元检测和闪元检测两个部分。恒定盲元处理流程为,(1)分别接收到高低温黑体数据后,缓冲再读取,计算得到响应差值图像数据;(2)响应差值图像经过3 \times 3窗口数据处理后,再进行中值滤波;(3)中值滤波后的图像与响应差值图像进行差值计算,得到评估图像;(4)评定图像进行恒定,盲元判断,直至整幅图像数据流结束。

闪元检测的处理流程为:(1)图像数据流经过3 \times 3窗口数据处理;(2)3 \times 3窗口数据进行次极值计

算;(3)次极值与3 \times 3窗口数据当前值进行比对,判断是否为闪元,直至整幅图像数据流结束。

盲元补偿的处理流程为:(1)原始数据流经过3 \times 3窗口数据处理,同时,读取盲元位置;(2)当前数据为盲元时,判断盲元周边3 \times 3窗口内盲元数量;(3)盲元数量=1时,经过有效数据提取和中值滤波处理,盲元数量 ≥ 2 时,经过有效数据提取,权重扩展和加权平均;(4)单帧数据全部补偿完成后结束。

为了快速完成盲元检测与补偿,一般采用FPGA作为红外成像系统主控^[14],FPGA接口配置灵活,IP核丰富^[15],适宜嵌入式信号处理^[16]。盲元检测与盲元补偿的FPGA实现流程如下:

2.3 仿真设计

盲元检测算法采用FPGA实现,固定盲元检测中用到比较重要的中值滤波计算,在盲元补偿中也有用到,下面给出闪元检测的modelsim仿真结果如下:

从图3可以看出,3 \times 3窗口在排序给出次极值后进行比对,blind_mark能够准确检出闪元位置,3 \times 3窗数据[1007, 1006, 1005; 1003, 1016, 1001; 999, 998, 997],检测到1016为闪元,符合算法设计预期。

盲元补偿的modelsim仿真结果如下:

从图4可以看出,3 \times 3窗口在有效数据提取后,中值滤波结果替换了原先的盲元像素值,3 \times 3窗数据[999, 998, 997; 995, 1056, 1006; 1004, 1003, 1002],补偿数据为1002,在ad_compen_data中进行了替换,实现了盲元补偿的功能。

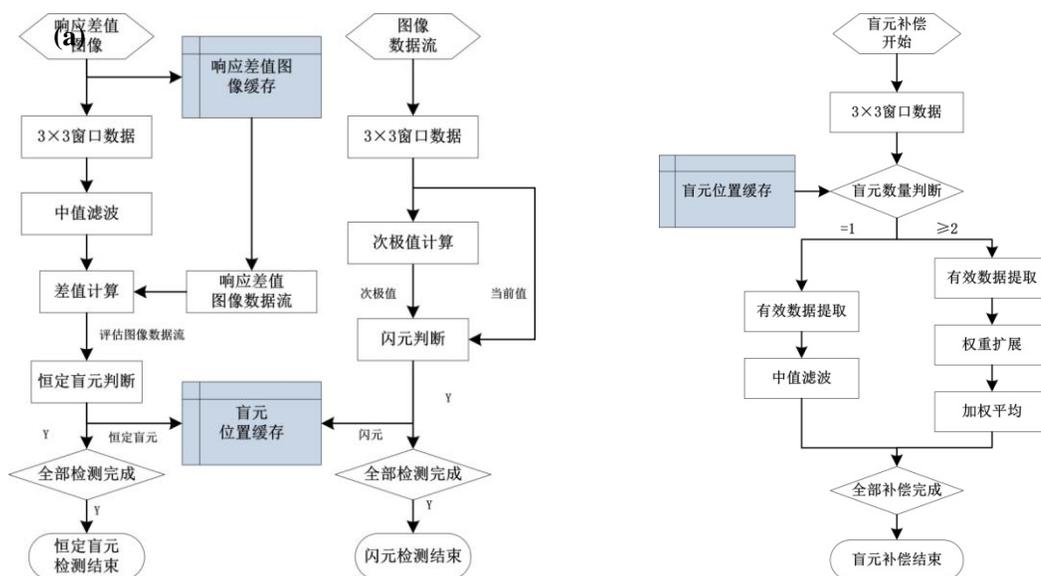


图2 FPGA处理流程:(a)盲元检测(b)盲元补偿

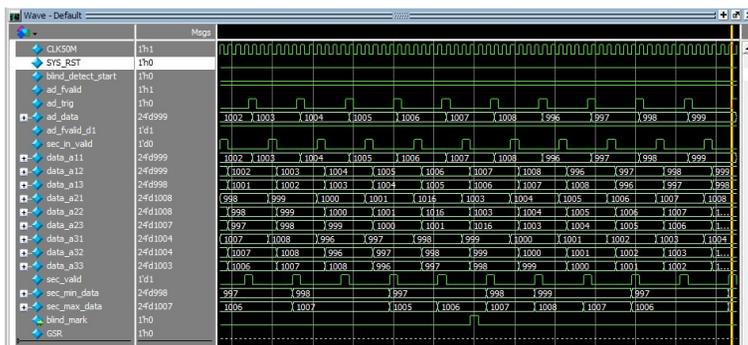


图3 闪元检测FPGA实现仿真结果

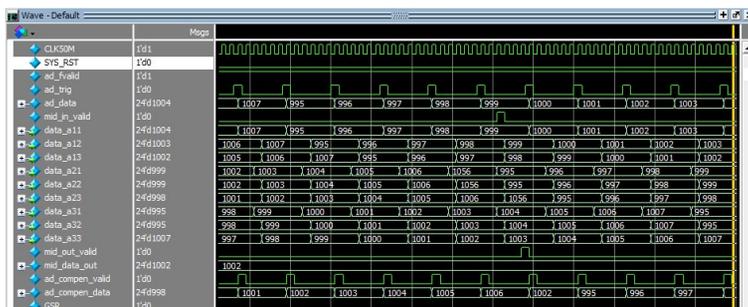


图4 盲元补偿FPGA实现仿真结果

3 盲元检测及补偿实现

3.1 实现平台

低温杜瓦光学成像系统实拍如下：
成像系统的关键光学元件参数如下：

表1 关键光学元件参数

元件	材质	关键参数	备注
透镜	Ge镀膜	透射波段:8~12um, 物距1500mm,像距160mm	
窗口片	KRS-5	透射波段:1~40um	

在满足杜瓦温度 $\leq 70\text{K}$ 、BIB 探测器工作于4-12K温区的要求下,实验系统实际运行时,杜瓦低温背景环境温度为52K,探测器工作温度稳定在8K。在此条件下,我们采集了同一探测器件对293K与333K两个黑体目标的成像数据。分别采集100帧数据,图6为100帧实验数据的时域平均结果,从图中可以看出,图像中随机噪声较多,呈现出“雪花”状,观测面源黑体时不同像元的输出值存在较大差异。

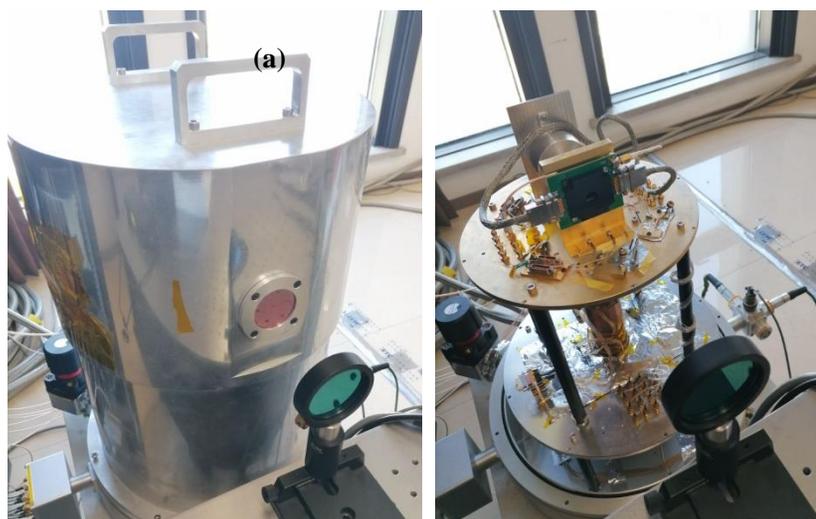


图5 低温杜瓦光学成像实物图:(a)整机图 (b)内部结构图

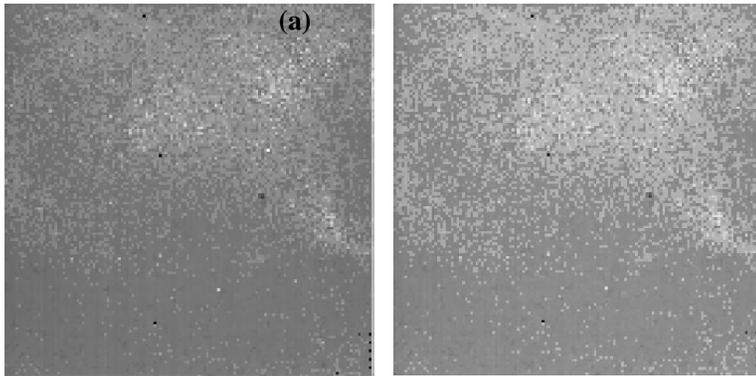


图6 黑体成像时域平均:(a)黑体设置为293K (b)黑体设置为333K

随后,针对两颗玻璃球进行了成像,成像目标并不限定为玻璃球,本例仅以玻璃球成像作为算法改进和对比的示例。本文提出的方法是一个通用性的盲元检测和补偿框架,选择玻璃球示例是基于其演示的便利性。

经两点校正法处理后得到图7(c),图中虽可辨识出两个玻璃球,但校正后的图像仍存在显著缺陷。具体表现为:图像中存在大量非均匀的“亮点”与“暗点”,温度表征混乱,且目标(玻璃球)与背景之间的温差对比度不足。这些缺陷主要由探测器

的盲元及其非均匀性响应引起。鉴于此,为实现准确的温度表征与目标识别,必须开发针对性的后期盲元检测与补偿算法,对原始图像进行修正。

3.2 盲元检测与补偿实现

3×3窗口数据实现如下图8,缓存两行数据,每行数据再缓存两个数据,形成3×3窗口数据:

3×3中值滤波的处理为:(1)每一行3个数据进行最大值、中间值和最小值判断;(2)上一步中3个最大值进行比较,3个中间值进行比较,3个最小值进行比较;(3)对上一步中最大值比较得到的最小

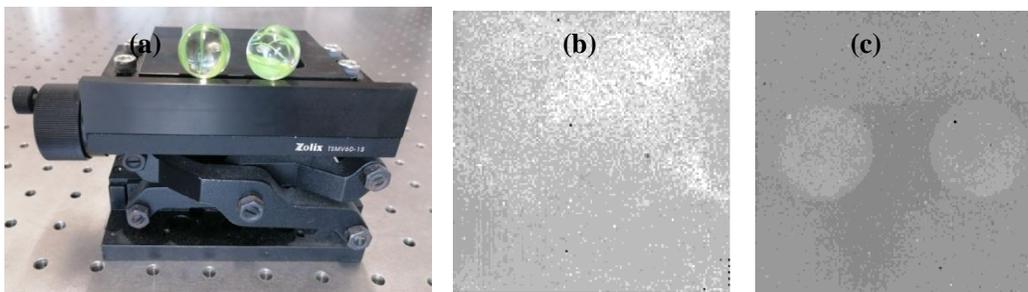


图7 玻璃球成像结果:(a)玻璃球实物 (b)玻璃球原始成像 (c)玻璃球两点校正后成像结果

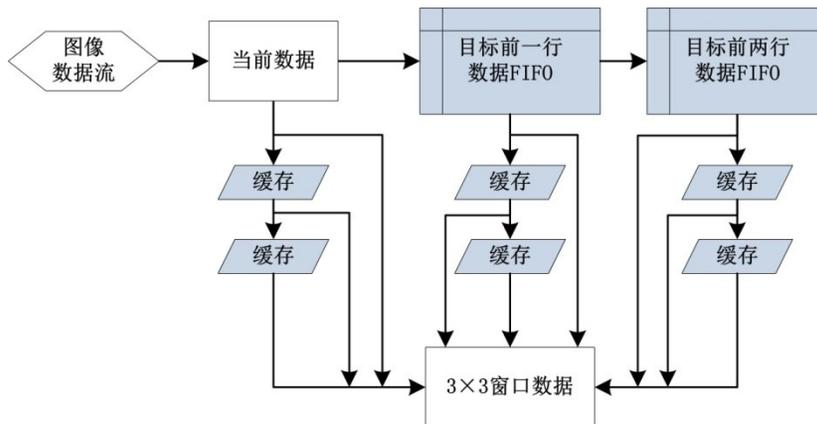


图8 3×3窗口实现结构

值,中间值比较得到的中间值,最小值比较得到的最大值,再进行一次比较,得到的中间值即为 3×3 数据的中值。

3×3 次极值计算的处理与 3×3 中值滤波的处理较为类似,前两步相同,第三步为:对上一步最大值比较得到的中间值和中间值比较得到的最大值,两个数比较得到 3×3 数据的次最大值;对上一步中间值比较得到的最小值和最小值比较得到的中间值,两个数比较得到 3×3 数据的次最小值。

3×3 中值滤波和 3×3 次极值计算过程如下图9:

本算法结构简单,硬件实现结构明确,并综合了中值滤波和双参考源的优点,参数容易选取,容易平衡过检测与欠检测问题。

4 结果和分析

4.1 盲元检测结果

定义盲元空间分布均匀性指数 P_{Uni} ,值越接近1,盲元分布约均匀;值越小,盲元分布约集中。

$$P_{Uni} = 1 - CV = 1 - \frac{\sigma_s}{\mu_s}, \quad (20)$$

式(20)中 σ_s 为所有子区域盲元数量的标准差, μ_s 为所有子区域盲元数量的平均值,CV即为离散系数。

定义块状盲元占比C

$$C = \frac{N_{block}}{N_{total}} = \frac{N_{block}}{N_{point} + N_{block}}, \quad (21)$$

式(21)中 N_{block} 为块状盲元数, N_{point} 为点状盲元数, N_{total} 为总盲元数。

当盲元取1%总像素数量时,采用一点定标法、基于双参考源盲元检测法、基于背景预测的盲元检测法、基于梯度的盲元检测法、基于滑动窗口的盲元检测法、局部 3σ 盲元检测法和基于双参考源的改进型恒定盲元检测法的检测结果如下:

计算盲元空间分布均匀性指数和块状盲元占比指标,结果如下:

从表1可以看出,改进方法的盲元空间分布均匀性指数指标最优,块状盲元占比指标最优,改进方法对盲元空间分布均匀性和块状盲元占比都实现了优化。

为了测试改进算法在不同盲元比例的效果,盲元取2%总像素数量时,采用一点定标法、基于双参考源盲元检测法、基于背景预测的盲元检测法、基于梯度的盲元检测法、基于滑动窗口的盲元检测法、局部 3σ 盲元检测法和基于双参考源的改进型恒定盲元检测法的检测结果如下:

计算盲元空间分布均匀性指数和块状盲元占

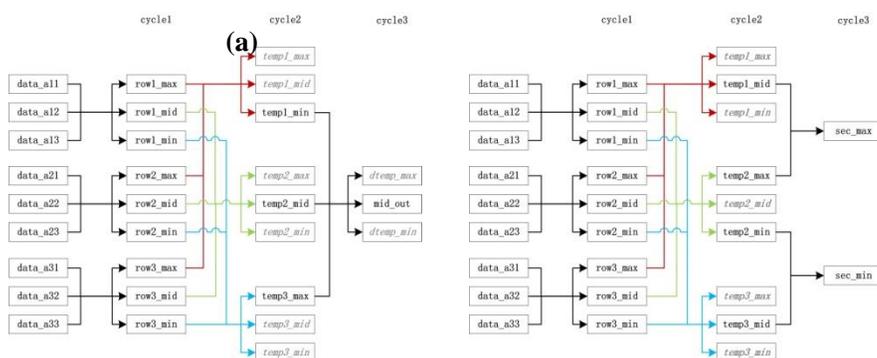


图9 FPGA 模块计算过程:(a)中值滤波 (b)次极值

表2 在1%盲元比例下不同检测法的恒定盲元计算指标

序号	检测方法	设置参数	N_{total}	P_{Uni}	C
1	一点定标法	[0.25 0.71]	165	-18.27	46.7%
2	基于双参考源盲元检测法	[0.1 0.538]	166	-3.372	18.1%
3	基于背景预测的盲元检测法	[0.42 0.759]	163	-13.26	27.0%
4	基于梯度的盲元检测法	[0.299 -]	164	-16.62	100%
5	基于滑动窗口的盲元检测法	[0.444 -]	161	-20.94	95.03%
6	局部 3σ 盲元检测法	[0.399 -]	162	-20.00	38.27%
7	基于双参考源改进方法	[0.1 0.5413] [0.14 0.75782]	164	-2.26	12.8%

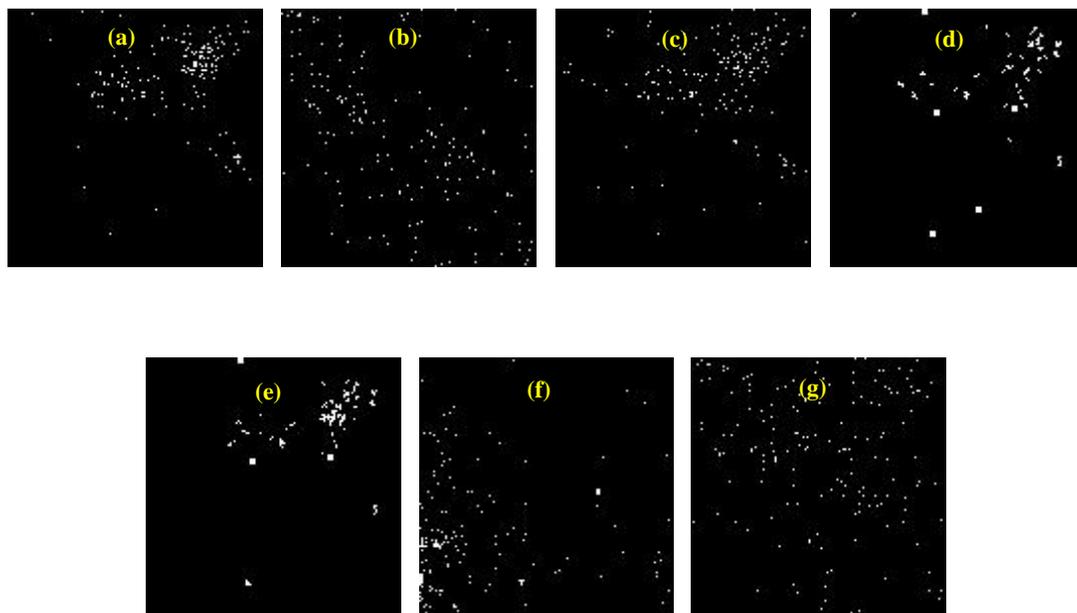


图 10 在 1% 盲元比例下盲元检测结果:(a)一点定标 (b)双参考源 (c)背景预测 (d)梯度 (e)滑动窗口 (f)局部 3σ (g)改进法

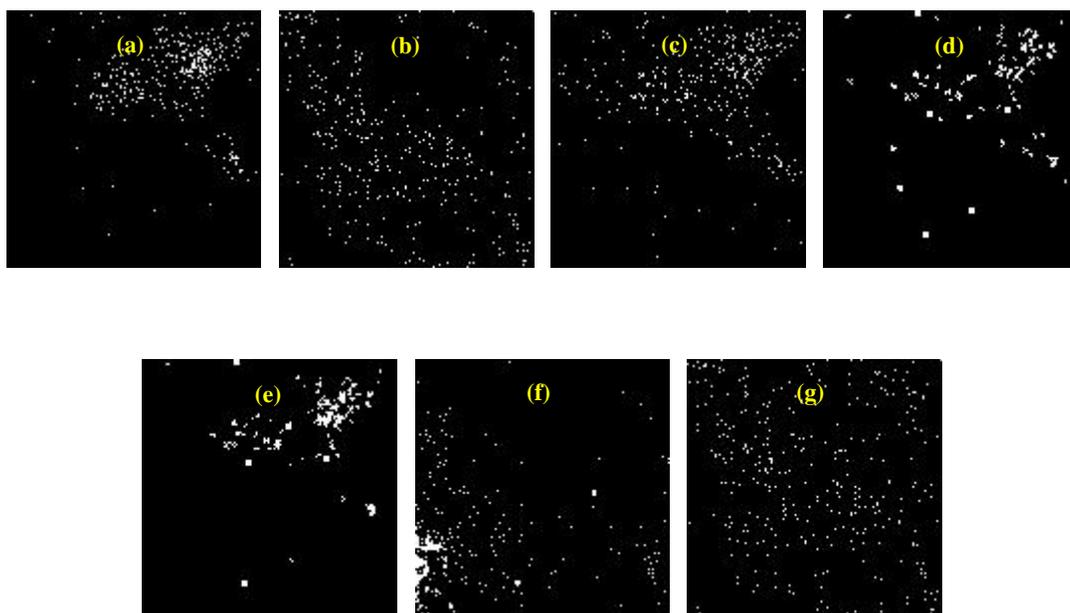


图 11 在 2% 盲元比例下盲元检测结果:(a)一点定标 (b)双参考源 (c)背景预测 (d)梯度 (e)滑动窗口 (f)局部 3σ (g)改进法

比指标,结果如下:

从表 2 可以看出,改进方法对盲元空间分布均匀性和块状盲元占比都实现了优化。

阈值 rate 设置为 0.035 时,结果如下:

闪烁盲元检测设置参数不变的前提下,从闪烁盲元数量对闪烁盲元检测法进行评估。

从表 3 可以看出,基于窗口次极值闪烁盲元检测法在盲元检测数量上有了较大提升。

4.2 盲元补偿结果

分别采用基于边缘信息的均值滤波、阿尔法均值滤波、中值滤波、背景预测和改进型中值滤波五种算法对对实时成像校正后的玻璃球数据图 7(b)

表 3 在 2% 盲元比例下不同检测法的计算指标

序号	检测方法	设置参数	N _{total}	P _{Uni}	C
1	一点定标法	[0.25 0.671]	330	-36.64	52.12%
2	基于双参考源盲元检测法	[0.1 0.5337]	327	-5.2	21.4%
3	基于背景预测的盲元检测法	[0.42 0.672]	327	-21.57	41.28%
4	基于梯度的盲元检测法	[0.254 -]	329	-25.61	100%
5	基于滑动窗口的盲元检测法	[0.418 -]	329	-40.14	96.96%
6	局部 3 σ 盲元检测法	[0.3918 -]	329	-53.52	51.37%
7	基于双参考源改进方法	[0.1 0.5352] [0.14 0.74928]	328	-3.06	16.16%

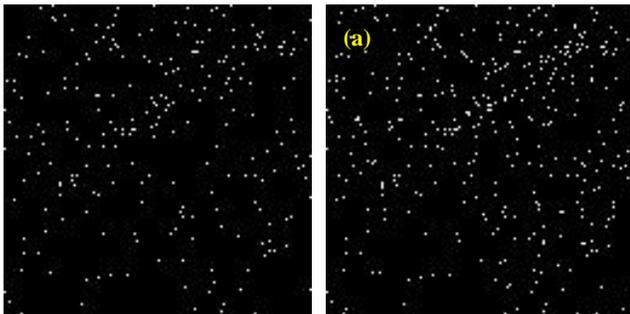


图 12 闪元检测结果:(a)常规法 (b)基于窗口次极值法

表 4 不同检测法闪烁盲元计算指标

序号	检测方法	设置参数	N _{total}
1	常规闪烁盲元检测法	0.035	239
2	基于窗口次极值闪烁盲元检测法	0.035	371

进行盲元补偿处理,结果如图 13 所示:

以 3*3 窗口进行滤波补偿,比较 5 类算法的计算复杂度如下:

改进型中值滤波盲元补偿的比例容限为 $\leq 5\%$, 响应容限范围为 5-12 σ .

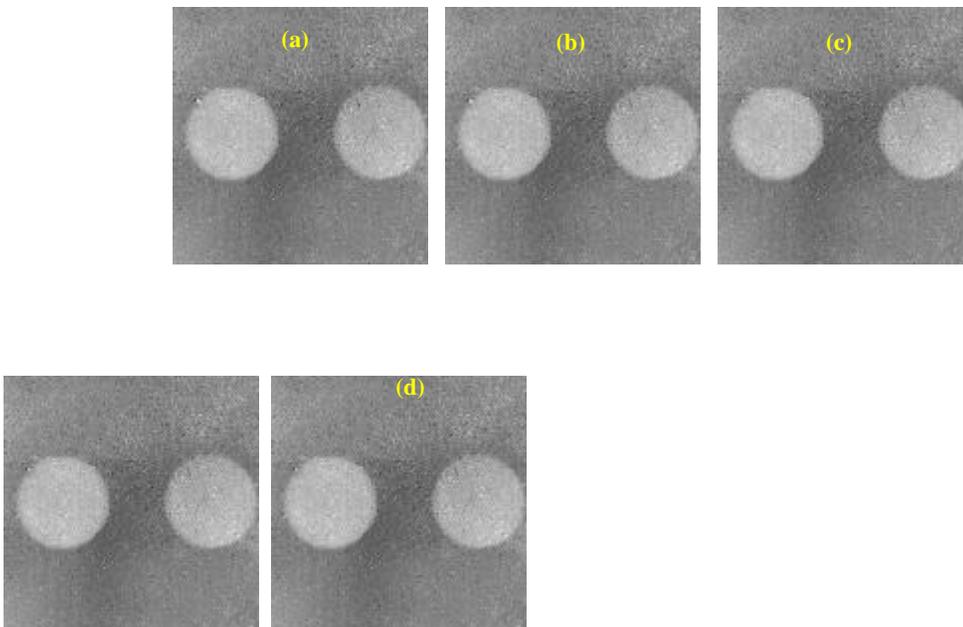


图 13 盲元补偿结果:(a)基于边缘信息的均值滤波(b)阿尔法均值滤波(c)中值滤波(d)背景预测(e)改进型中值滤波

表5 盲元补偿计算复杂度对比

序号	方法	乘法次数	加法次数	比较次数	除法次数	特殊运算
1	基于边缘信息的均值滤波	12	13	12	1	4次绝对值运算
2	阿尔法均值滤波(d=1)	0	5	28	1	0
3	中值滤波	0	0	21	0	0
4	背景预测(权重窗口为3*3)	8	14	0	1	0
5	改进型中值滤波盲元补偿	0-8	0-14	0-21	0-1	0

从表4可以看出,基于边缘信息的均值滤波运算复杂度较高,不利于硬件的实现。从图7(右)可以看出,玻璃球成像数据中的噪声以椒盐噪声为主,基于边缘信息的均值滤波和阿尔法均值滤波以均值滤波作为盲元补偿手段,对噪声的抑制效果较差,并容易模糊图像边缘和细节。常规的中值滤波算法能高效的处理椒盐噪声,计算复杂度适中,但对块状噪声处理效果不佳。单纯的背景预测算法对块状盲元处理效果较好,计算复杂度适中,但对点状盲元补偿效果欠佳。

因此,在中值滤波的基础上提出了改进型盲元补偿方法,综合了中值滤波和背景预测算法两者的优点,点状盲元采用中值滤波处理,块状盲元采用背景预测处理,且计算复杂度适中。

4.3 分析

为提高BIB红外探测图像盲元检测和补偿的适应性,从利于硬件实现的角度出发,本文提出了一种基于双参考源的改进型恒定盲元检测法和基于窗口次极值判别的改进型闪烁盲元检测法,和改进型中值滤波盲元补偿法,经过对比验证,改进后盲元检测和盲元补偿法,能够对针对BIB探测图像中的盲元起较为理想的检测和补偿效果。并对该算法进行FPGA实现,验证了算法硬件实现的可行性。

初步实验结果表明,算法改进对系统良率提升显著。在典型样本量为20片的一批次BIB芯片中,应用所提方法前的基础良率约为30%;而应用改进的盲元检测与补偿算法后,该批次良率可提升至≥80%。

参考文献

[1] Wang X, Ma W, Chen Y, et al. Spectral response mechanism associated with the thickness of the absorbing layer in GaAs-based blocked impurity band (BIB) far infrared detectors[J]. *Optical & Quantum Electronics*. 2021; 53(6): 1-9.

[2] Wang X, Ma W, Chen Y, et al. Carrier transport mechanism associated with the thickness of the absorbing layer in

GaAs-based blocked impurity band (BIB) far infrared detectors[J]. *Optical & Quantum Electronics*. 2021; 53(5): 1-9.

- [3] Tong W, Chen Y, Wang L, et al. The enhanced terahertz absorption of metal gratings/Si-based blocked-impurity-band (BIB) hybrid structures[J]. *Optical & Quantum Electronics*. 2021; 53(11): 1-13.
- [4] Dong Z, Zhou Y, Chen Y, et al. The Anti-Reflection Coating Design for the Very-Long-Wave Infrared Si-Based Blocked Impurity Band Detectors [J]. *Crystals* (2073-4352). 2023; 13(1): 60.
- [5] Cheng Fei, Junliang Liu, Tao Li, et al. Characterization and calibration of blind pixels in short-wave infrared In-GaAs focal plane arrays[J]. *Optical Engineering*. 2019; 58(10): 1-7.
- [6] Szajewski K, Szajewska A, Urba S, Wi cek B. Review on infrared single-pixel imaging [J]. *Opto-Electronics Review*. 2025; 33(2): 1-12.
- [7] An Q, Liu T, Huang Z, Zeng H. Learning wavelet-transform based sparsity knowledge for blind infrared images restoration in students' training in the wild[J]. *Infrared Physics & Technology*. 2021; 119.
- [8] Liu H, Yuan K, Shen B, Xing W, Huang M. Blind super-resolution reconstruction of infrared images based on dual-domain feature extraction[J]. *Optics & Lasers in Engineering*. 2025; 193: 109109-109109.
- [9] Zhao J, Cheng R. Blind infrared images reconstruction using covariogram regularization from a regular pentagon [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2022; 120.
- [10] Urba S, Wi cek B. Application of a deep-learning neural network for image reconstruction from a single-pixel infrared camera [J]. *Opto-Electronics Review*. 2024; 32(1): 1-6.
- [11] Jingjing Lu, Jun Zhang, Xinv Wang, Chengzhi Deng, Chao Zhang. Blind Image Deconvolution Based on Adaptive Weighted L0 Gradient Prior[J]. *IAENG International Journal of Computer Science*. 2023; 50(4): 1510-1516.
- [12] Zhao X, Li M, Nie T, Han C, Huang L. Blind Infrared Remote-Sensing Image Deblurring Algorithm via Edge Composite-Gradient Feature Prior and Detail Maintenance [J]. 2024; 16(24): 4697.
- [13] Laznicka T, Kizovsky M, Hrubanova K, et al. Assembly for semi-correlation analysis of samples using cryogenic scanning electron microscopy and cryogenic Raman micro-spectroscopy [J]. *Measurement Science & Technology*. 2025; 36(5): 1-10.
- [14] Doner T, Gokcen D. FPGA-based infrared image deblurring using angular position of IR detector[J]. *Visual Computer*. 2021; 37(7): 2039-2050.

- [15] Cheng J, Pan L, Liu T, Cheng B, Cai Y. FPGA-Based Real-Time Deblurring and Enhancement for UAV-Captured Infrared Imagery [J]. *Remote Sensing*. 2025; 17(20):3446.
- [16] Wang X, He X, Zhu X, Zheng F, Zhang J. Lightweight and Real-Time Infrared Image Processor Based on FPGA [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2024;24(4).
- [17] Ke Deng, Jiayang Guo, Kun Zhang, Yunlong Xiao, Qing Li, Tao Zhang, Dezhen Guo, Ting He, Zhiping He, Peng Wang, Ning Li, and Weida Hu. All-Silicon Broadband Infrared Photodetectors With In-Plane Photon Trapping Structures. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*. 2025; 37(17).
- [18] Tao Zhang, Wenrui Wei, Jiayang Guo, Kun Zhang, Ruling Huang, Wei Xiong, Deyu Zhu, Rong Zhao, Shikun Duan, Ning Li, Peng Wang, and Weida Hu. Interface-Controlled Performance in VLWIR Blocked Impurity Band Photodetectors, *IEEE Electron Device Letters*. 2025; 46(6), 956–959.
- [19] Jiayang Guo, Tao Zhang, Kun Zhang, Ke Deng, Reng Wang, Hailu Wang, Gang Chen, Pingping Chen, Ning Li, Peng Wang, and Weida Hu. Sharp Interface Blocked Impurity Band Very Long-wavelength Infrared Photodetector with High-temperature Epitaxy. *IEEE Electron Device Letters*. 2024; 45(6):952–955.