

## 基于多方向小波提升 IRFPA 盲元检测精度方法

张 瞳<sup>1,2</sup>, 林 春<sup>1</sup>, 陈洪雷<sup>1</sup>, 周松敏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 红外焦平面成像质量受材料生长及器件制备工艺的影响, 易出现盲元、条纹噪声等缺陷。条纹噪声经常会导致盲元的检测偏差, 准确的盲元检测对于后续图像处理具有重要意义。利用双密度双树复数小波分解的多方向性小波系数, 结合广义高斯分布将高频小波系数按照对条纹噪声影响程度分别赋予不同权值并进行单支重构, 消除了条纹噪声对盲元检测的影响, 得到初步“干净”的预处理图像, 进而对预处理图像运用  $3\sigma$  准则进行盲元检测。通过短波 HgCdTe 红外焦平面成像的实践验证, 该方法对具有条纹噪声特征的红外图像盲元检测更加准确。

**关键词:** 红外焦平面; 盲元检测; 条纹噪声; 双密度双树复数小波

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0204001

## A method of improving IRFPA imaging bad pixel detection accuracy based on multi-direction wavelet

Zhang Tong<sup>1,2</sup>, Lin Chun<sup>1</sup>, Chen Honglei<sup>1</sup>, Zhou Songmin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Material and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics of The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Subjected to the material quality and the device fabrication techniques, the IRFPAs usually suffer from bad pixels and stripe noise. The accuracy of the bad pixel detection is always influenced by the stripe noises, which should be optimized for more precise imaging processing. A preliminary "clean" image was accomplished without the influence of stripe noises by reconstructed double density double tree complex wavelet coefficients with different weights. After that, the image preprocessing was utilized to detect the bad pixels with  $3\sigma$  criterion. Finally, this method was testified by a image processing from short-wave IRFPA. The bad pixels detection in the infrared image is much more accurate in spite of the stripe noise.

**Key words:** IRFPA; blind pixels detection; stripe noise; double density double tree complex wavelet

收稿日期: 2017-08-20; 修订日期: 2017-10-03

作者简介: 张瞳(1981-), 男, 博士生, 主要从事红外器件成像方面的研究。Email: 4340426@qq.com

导师简介: 林春(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外探测器方面的研究。Email: chun\_lin@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

红外焦平面探测器(IRFPA)因其可以获取高分辨率红外图像而在科技、国防等领域被广泛使用。但红外焦平面由于器件工艺水平(如钝化、光刻、倒焊)及材料等的影响,存在着系统噪声、非均匀性噪声及响应很高和无响应的盲元<sup>[1]</sup>。在实际的探测器盲元检测应用中,非均匀性条纹噪声会对盲元检测造成干扰,导致盲元误判。更加准确的盲元检测对于后续的红外图像处理极其关键。

国内外针对盲元检测的算法主要有以下两种:定标法<sup>[2-3]</sup>和基于场景检测的方法。定标法对于固定盲元检测有较好的效果,但对于探测器产生的随机盲元不能满足实时性检测。基于场景检测的方法主要有  $3\sigma$  准则<sup>[4-5]</sup>、帧间统计检测法<sup>[6-8]</sup>、线性外推失效元检测法<sup>[9]</sup>。 $3\sigma$  准则是基于均匀背景的红外成像灰度值服从正态分布,利用盲元特性和统计特征,将响应灰度值在平均响应灰度值  $3\sigma$  之外的判定为盲元,其缺点是易将点元误判。帧间统计检测法是通过场景信息统计实现随机盲元检测。其对于硬件运算速度有很高要求,且受制于场景变化速度。线性外推失效元检测法对于成片的盲元区域检测无优势,且检测精度和阈值选取有关。目前国外对于盲元检测的研究热点以基于场景检测的方法为主。总的来说,以上方法各有缺点,还需要更进一步深入研究。

文中采用笔者单位自行研制的短波 MCT640×512 制冷型 HgCdTe 红外探测器成像,采用  $3\sigma$  准则进行盲元检测,条纹噪声对于  $3\sigma$  准则盲元检测精度有严重影响。文中提出用 DD-DTCWT 对图像进行分解,根据小波分解后的高频系数统计具有广义高斯分布的特点,计算出不同高频小波系数受到条纹噪声干扰的程度,再据依干扰程度对高频小波赋以不用的权重值,将赋值后的小波系数依次进行单支小波重构。利用原始图像和重构图像计算得到去除噪声条纹后“干净”的均匀性图像,再用  $3\sigma$  准则对“干净”图像进行盲元检测,有效提高了检测精度。

## 1 双密度双树复数小波变换

小波分析已成为图像处理的主流方法之一。双密度双树复数小波(DD-DTCWT)结合了双树复数小波与双密度小波的优点,具有更多的方向选择性和平移不变性等特点。双密度小波具有三个滤波器组,

$h_0, h_1, h_2$  分别为低通滤波器、高通一阶滤波器、高通二阶滤波器。它具有两个尺度函数和四个小波函数,即:  $\psi_{h,i}(t), \psi_{g,i}(t), (i=1, 2)$ 。

两个小波函数满足下列公式:

$$\psi_{h,1}(t) \approx \psi_{h,2}(t-0.5) \quad (1)$$

$$\psi_{g,1}(t) \approx \psi_{g,2}(t-0.5) \quad (2)$$

并且  $\psi_{h,i}(t), \psi_{g,i}(t)$  互为近似的 Hilbert 变换对:

$$\psi_{g,1}(t) \approx H\{\psi_{h,1}(t)\} \quad (3)$$

$$\psi_{g,1}(t) \approx H\{\psi_{h,2}(t)\} \quad (4)$$

DD-DT CWT 是使用四个双密度离散小波对输入图像同时进行并行分解而完成的。其所用的迭代滤波器组如图 1 所示。

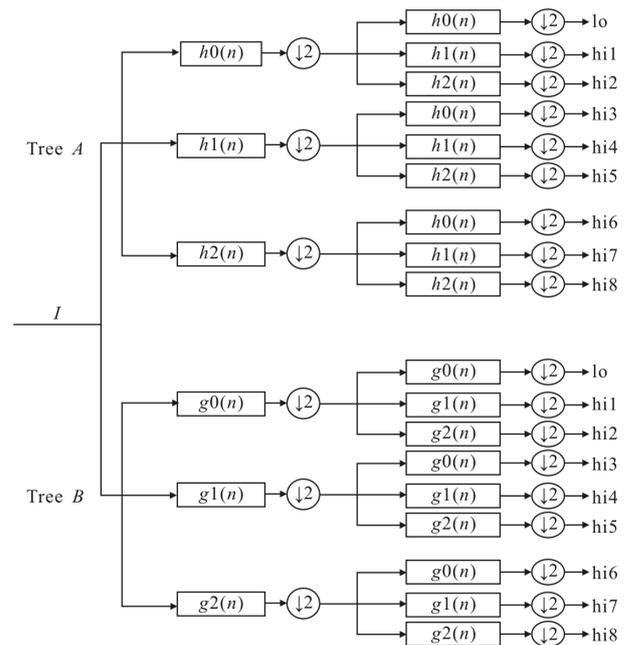
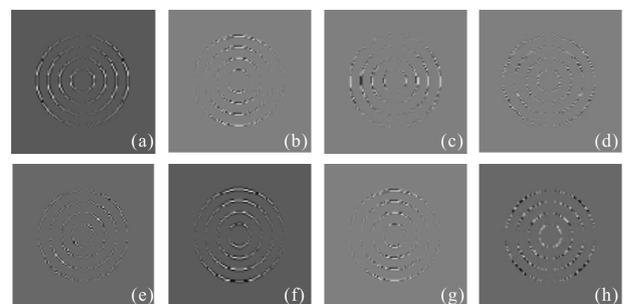


图 1 DD-DCWT 分解滤波器

Fig.1 DD-DCWT decomposition filter

输入图像  $I$  经过滤波器的分解,最后在每一层分解层上生成 32 个小波系数,如图 2 所示,其中主方向的小波系数为 16 个,每个方向对应两个小波系数,分别为该方向的实部和虚部。DD-DTCWT 与普通二维



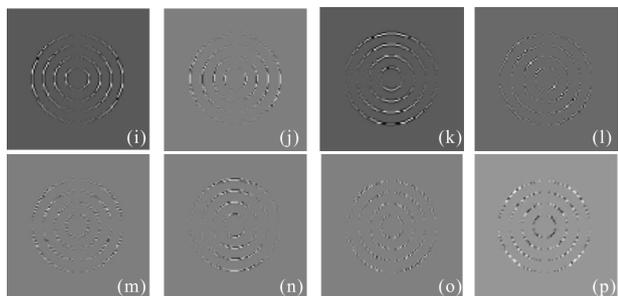


图 2 DD-DTCWT 16 个高频系数分解示意图

Fig.2 Decomposing diagram of 16 high frequency coefficient of DD-DTCWT

小波(如图 3 所示)相比具有更多的方向选择性及更加精确的高频细节信息。

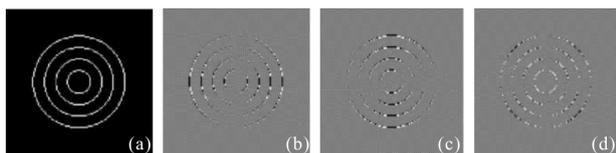


图 3 原始图及 Haar 小波 3 个高频系数分解示意图

Fig.3 Original figure and 3 high frequency coefficient of Haar wavelet

## 2 广义高斯分布的小波系数权值计算

图像经过小波变换后, Mallat 指出小波系数在

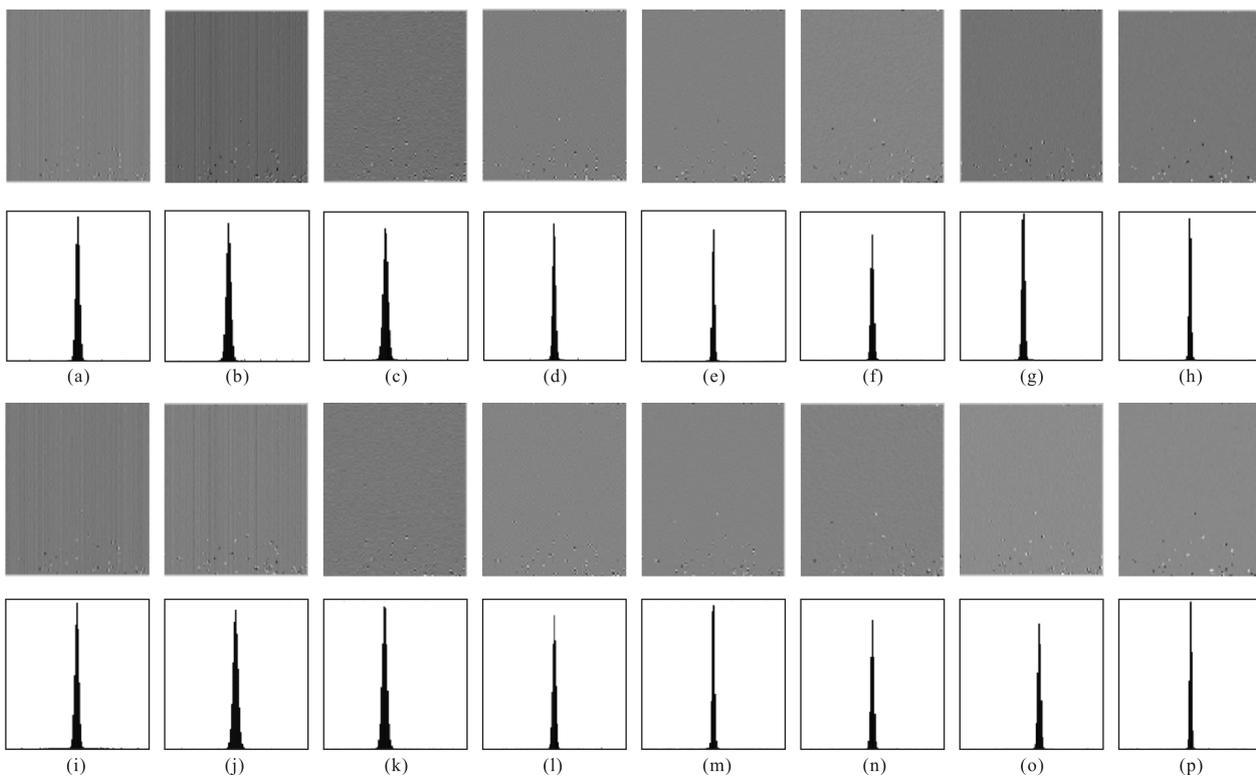


图 4 DD-DCWT 16 个高频系数图及对应的直方图广义高斯分布

Fig.4 16 high frequency coefficient figures of DD-DCWT and the corresponding histogram of generalized Gaussian distribution

各个尺度的直方图可以用概率密度函数来近似, 近似地满足广义高斯函数的分布因此, 利用小波分解的高频小波系数直方图分布, 找出对盲元检测有较大影响的小波系数, 并利用子带间的小波系数的 KLD(Kullback-Leibler Distance)距离对进行单支重构的小波系数赋予不同的权重。

### 2.1 小波系数的广义高斯分布函数

广义高斯分布函数的表达式为:

$$P(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{2\alpha\Gamma(1/\beta)} e^{-(|x|/\alpha)^\beta} \quad (5)$$

其中,  $\Gamma$  函数为:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  分别称为广义高斯函数的尺度参数和形状参数。经过 DD-DTCWT 分解的小波高频系数统计直方图也满足广义高斯函数的分布。通过小波分解后的高频小波系数如图 4 所示, 在高频中找出一幅明显具有竖直条纹噪声的小波系数图像, 利用 KLD 距离计算出其余小波系数与具有噪声条纹的距离, 即相似度。根据距离给每个小波系数赋予不同权值。

KLD 距离表示如下：

$$D(p(\alpha_1, \beta_1)||p(\alpha_2, \beta_2)) = \log \left( \frac{\beta_1 \alpha_2 \Gamma(1/\beta_2)}{\beta_2 \alpha_1 \Gamma(1/\beta_1)} \right) + \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \cdot \left( \frac{\Gamma((\beta_2+1)/\beta_1)}{\Gamma(1/\beta_1)} \right) - \frac{1}{\beta_1} \quad (7)$$

式中：利用 DD-DTCWT 的小波系数服从广义高斯分布计算可得每个小波子系数的  $\alpha$ 、 $\beta$ 。将两个小波系数的形状参数和尺度参数分别代入公式(7)后可得两幅小波系数图像之间的距离。

### 2.2 小波系数的权值

表 1 为计算相应竖条纹噪声明显的 DD-DTCWT 高频子系数所对应的广义高斯分布的尺度函数和形状参数。

表 1 典型条纹噪声小波系数分布参数值

Tab.1 Distribution parameter values of typical stripe noise wavelet coefficient

Wavelet subcoefficient image	$\alpha$	$\beta$	$d$
<i>a</i>	0.636 0	0.276 7	$d_{av}=0$
<i>b</i>	0.598 0	0.215 4	$d_{av}=0.592 0$
<i>i</i>	0.651 0	0.294 9	$d_{av}=0.041 3$
<i>j</i>	0.614 0	0.229 0	$d_{av}=0.034 6$
<i>c</i>	0.586 5	0.226 8	$d_{av}=1.238 7$
<i>f</i>	0.521 3	0.201 5	$d_{av}=1.568 2$

利用小波系数的单支重构可以很好地去掉条纹噪声的影响。其公式如下：

$$\bar{I} = I - \bar{D}_j^n, n=1, \dots, 16; j=1, 2 \quad (8)$$

式中： $I$  为原始图像； $\bar{D}$  为各个尺度下单支重构不同高频子系数的图像之和； $n$  为各个方向的高频小波系数； $j$  为小波变换尺度。

$$\bar{D} = D^1 + D^2 + \dots + D^{15} + D^{16} \quad (9)$$

$$\begin{cases} D^1 = W_1^1 D_1^1 + W_2^1 D_2^1 \\ D^2 = W_1^2 D_1^2 + W_2^2 D_2^2 \\ \dots \\ D^{15} = W_1^{15} D_1^{15} + W_2^{15} D_2^{15} \\ D^{16} = W_1^{16} D_1^{16} + W_2^{16} D_2^{16} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $W$  为单支小波重构的权值。权值的大小决定了小波重构后去除条纹噪声的效果，故采用高频小波系数在不同尺度下与具明显竖条纹噪声小波系数的

KLD 距离来判定。

$$\begin{cases} W=1, KLD \leq 1 \\ W=-1, 1 \leq KLD \leq 10 \\ W=0, KLD > 10 \end{cases} \quad (11)$$

$W$  的取值准则为：将与竖条纹小波噪声子系数 KLD 距离小于等于 1 的系数权值取 1；将距离大于 1 小于 10（针对该器件实验得出数值）的系数权值取 -1；距离大于 10 的完全不相关的系数赋 0。通过 KLD 的判断，可将噪声条纹影响大的子系数准确找出，并经过系数单支重构后在时域中能够得到更加“干净”的去条纹噪声的图片，为后面的“ $3\sigma$ ”准则精确盲元检测提供较好的预处理图像。

## 3 准则结合 DD-DTCWT 盲元检测算法

### 3.1 标准差法

由于均匀背景的红外图像像素值在时域中的直方图统计中服从高斯分布，运用数理统计中的  $3\sigma$  准则可对图像中的盲元进行检测。其检测公式如下：

$$-3\sigma \leq (I(i, j) - \mu) \leq 3\sigma \quad (12)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j)}{M \times N} \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - \mu)^2}{M \times N}} \quad (14)$$

式中： $I(i, j)$  为图像中每个像素灰度值； $\mu$  为图像像素平均值； $\sigma$  为标准方差； $M$ 、 $N$  分别为图像的行、列数。

### 3.2 盲元检测算法描述

文中提出的方法是利用 DD-DTCWT 结合广义高斯分布对条纹噪声影响较大的小波系数进行赋权重单支重构，得到“干净”的预处理图像，在时域中再运用  $3\sigma$  准则进行盲元检测，以提高盲元检测精度。其步骤如下：

(1) 利用 DD-DTCWT 变换对原始红外图像进行二层分解；

(2) 对步骤(1)分解所得到的低频小波系数进行直方图统计，并计算得到每个小波子系数所服从的高斯正态分布的形状参数  $\alpha$ 、 $\beta$ ；

(3) 利用 KLD 距离判别式，对每层小波分解高频系数做出判定，对条纹噪声影响大的赋给权值 1，影响小的赋值 -1，完全没有影响的为 0；

(4) 进行小波系数赋权值后的单支重构,并在时域中减去重构后的噪声图像,去除条纹噪声对盲元检测的影响;

(5) 对去噪后的图像运用  $3\sigma$  准则对盲元进行判定。

#### 4 实验结果及分析

文中采用分辨率为  $640 \times 512$  的制冷型短波 HgCdTe 红外焦平面探测器成像。该器件结构为 n-on-p 型平面结构,如图 5 所示,光敏元中心距为  $25 \mu\text{m}$ ,尺寸为  $18 \mu\text{m}$ 。选取成像中部分像元成像( $256 \times 256$ )。盲元检测的方法较多,但针对图像具有明显条纹噪

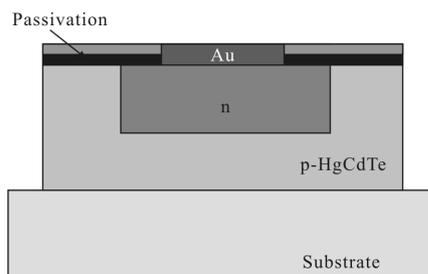


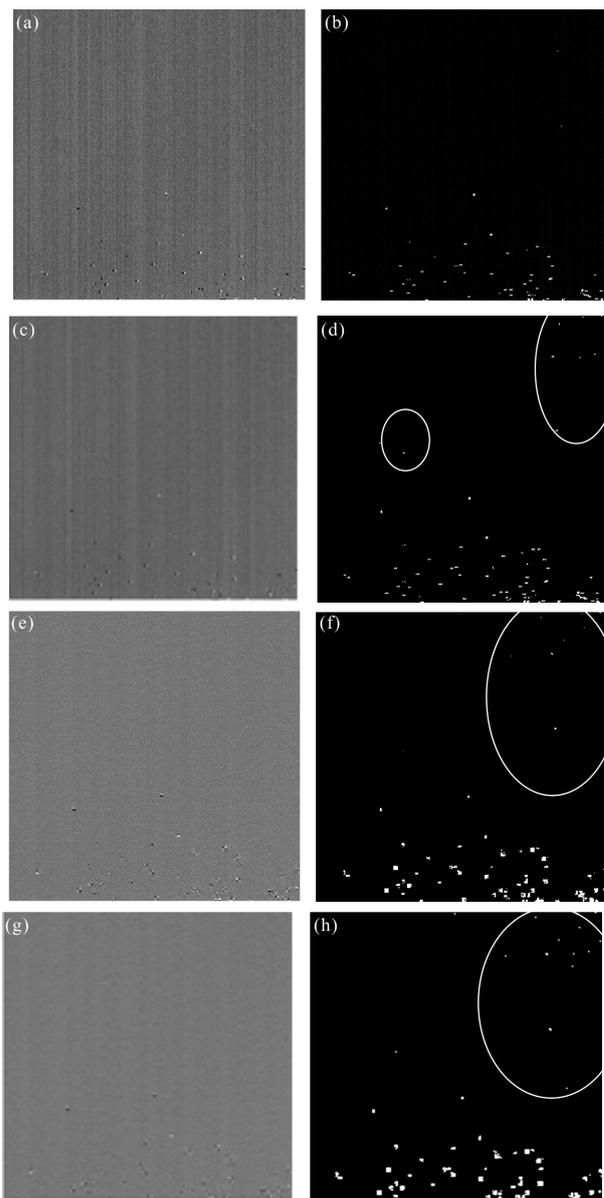
图 5 器件结构图

Fig.5 Figure of device structure

声干扰的盲元检测方法较少,且已有文献针对条纹噪声去除方法对高频系数的权重赋值为人眼观察噪声干扰程度,不具备算法自适应性,鲁棒性较差。故对于此类受条纹噪声干扰较大的红外探测器成像,去除条纹噪声的干扰显得尤为重要。实验中盲元检测的方法为利用双密度双树复数小波多方向性,对高频系数符合广义高斯分布计算出小波单支重构所乘权重系数,得到去除条纹噪声图像,再利用较为主流的  $3\sigma$  准则和具有滑动窗口<sup>[10]</sup>( $11 \times 11$ ) $3\sigma$  准则两种方法进行盲元检测,并与无消除条纹噪声的图像检测结果进行对比。图 6 为实验所成图像:图(a)、(c)为室温下面源黑体辐射所成均匀背景像,具有明显的条纹噪声;图(b)、(d)分别为对具有条纹噪声图像进行  $3\sigma$  准则和滑动窗口的  $3\sigma$  进行盲元检测的结果;图(e)、(g)分别为普通小波单支重构后去除噪声条纹图像,所对应图(f)、(h)分别为对成像进行  $3\sigma$  准则和滑动窗口的  $3\sigma$  进行盲元检测的结果;图(i)、(k)分别为利用双密度双树复数小波单支重构去除条纹噪声后所成图像,所对应图(j)、(l)分别为对成像进行  $3\sigma$  准则和滑动窗口的  $3\sigma$  进行盲元检测的结果。

如图 6 所示,图(a)、(c)为探测器在均匀黑体辐射下成像,其受到非均匀性及材料、工艺等影响,条纹较为明显;图(e)、(g)是经过 Haar 小波去条纹重构后的图像,较图(a)、(c)条纹噪声影响有较为明显的改善,且具有一定的增强效果。但是其分解的高频小波只有三个方向,方向性不足,故单支重构后得到的图像条纹依然可见;图(i)、(k)是 DD-DCWT 重构后的图像,因其具有 16 个高频小波,高频信息更加丰富,重构后的去除条纹噪声效果明显比 Haar 小波好,形成均匀的图像,几乎看不到条纹噪声。

从检测结果来看,对原始条纹噪声图直接用  $3\sigma$  准则及滑动窗口  $3\sigma$  检测出的数目较少,但滑动窗口  $3\sigma$  因其算法优越性比直接用  $3\sigma$  检出的盲元更多,



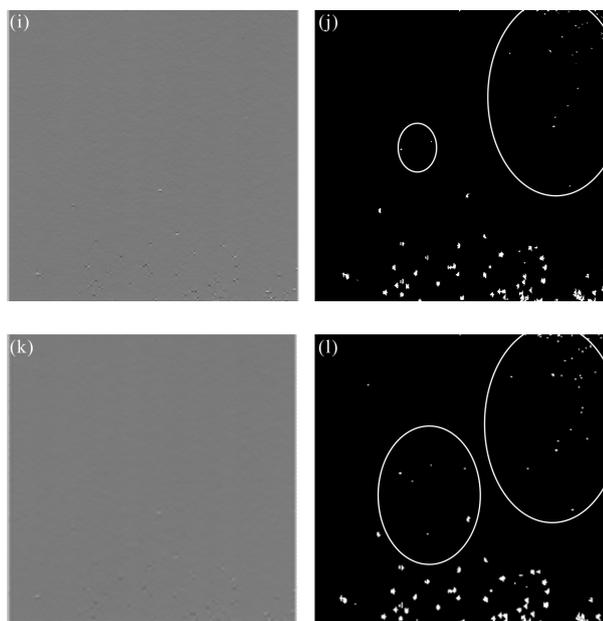


图 6  $3\sigma$  准则及滑动窗口  $3\sigma$  检测结果

Fig.6 Detection results with  $3\sigma$  criterion and sliding window of  $3\sigma$  criterion

但相比较 Haar 小波重构检测出的图(f)、(h)数目要少,证明了条纹噪声的干扰存在明显的漏检情况。DD-DCWT 的检测结果图(j)、(l)较 Haar 小波因其预处理图像消除条纹噪声更为彻底,受到条纹噪声的影响更小,故检测准确度更高,且通过图中的小圈可以看出,该方法还兼具图像增强性能。表 2 为采用不同方法进行盲元检测的数据统计结果。

表 2 盲元检测结果

Tab.2 Bad pixel detection result

	Original image	Haar	DD-DCWT	Original image+window	Haar +window	DD-DCWT + window
Blind pixel number	206	387	511	286	453	602
Blind pixel rate	0.3143%	0.5905%	0.7797%	0.4364%	0.6912%	0.9186%

## 5 结论

文中方法基于均匀背景的场景检测,利用了双密度双树复数小波的多方向性,结合小波系数直方图符合广义高斯分布计算出对条纹噪声影响的小波

系数赋不同的权值并单支重构,得到初步“干净”的预处理图像,消除了实际应用中条纹噪声对盲元检测的影响,再用  $3\sigma$  准则及其改进窗口算法进行盲元检测,并且对比了  $3\sigma$  准则盲元检测法及与  $3\sigma$  准则分别与普通小波结合、DD-DCWT 结合的盲元检测方法。实验证明该方法的效果明显,检测更加准确。但在小波重构时,高频系数里仍有少量的图像细节信息,会导致重构后图像细节受到损失。下一步的工作需要将细节与条纹噪声区分后再做重构,尽量保证图像细节信息不损失。

## 参考文献:

- [1] Hao Lichao, Huang Aibo, Lai Canxiong, et al. Research of IRFPAs' reliability evaluation by bad pixel [C]//SPIE, 2015: 96740H.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17444-2013 红外焦平面阵列参数测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [3] Chen Dachuan, Liu Chanlao, Zhen Yangguang. Algorithm of blind pixels auto-searching and compensation for IRFPA [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1215-1217. (in Chinese)
- [4] Luo Maojie, Zhou Jinmei, Liao Sheng. Composite blind-pixel detection and compensation algorithm [J] *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38 (12): 57-62. (in Chinese)
- [5] Zhang Ke, Zhao Guifang, Cui Ruiqing, et al. Method of improving bad pixel detection precision of IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 453-456. (in Chinese)
- [6] Leng Hanbing, Gong Zhendong, Xie Qingsheng, et al. Adaptive blind pixel detection and compensation for IRFPA based on fuzzy median filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 821-826. (in Chinese)
- [7] Cao Yang, Jin Weiqi, Liu Chongliang. IRFPA dynamic blind element detection algorithm based on scene [C]//National Optoelectronics and Quantum Electronics Conference, 2011 (6): 91-95.
- [8] Sergio Goma, Milivoje Aleksic. Bad pixel location algorithm for cell phone cameras[C]//SPIE, 2007: 65020H-10.
- [9] Zhao Chunhui, Liu Zhenlong. A bad pixel detection algorithm for infrared focal plane array based on linear extrapolation theory [J]. *Journal of Shenyang University*, 2013, 25 (4): 293-297. (in Chinese)
- [10] An Guangqi, Zhao Yan, Zhang Haifeng. Blind pixel detection and compensation on infrared detector [J]. *Aero Weaponry*, 2016(3): 54-58. (in Chinese)