

中文引用格式:徐守龙,侯志雄,魏翠悦,等. 基于FPGA的辐射噪声抑制与剂量信息提取方法[J]. 中国安全科学学报,2025,35(3): 85-91.

英文引用格式:XU Shoulong, HOU Zhixiong, WEI Cuiyue, et al. Radiation noise suppression and dose information extraction method based on FPGA[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 85-91.

基于FPGA的辐射噪声抑制与剂量信息提取方法*

徐守龙 副教授, 侯志雄, 魏翠悦, 邹树梁 教授
(南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

中图分类号:X945 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.1820

基金项目:国家自然科学基金资助(11905102)。

【摘要】 为完善和发展基于像素传感器的核辐射探测监测一体化技术,提出一种基于现场可编程门阵列(FPGA)并行优势的辐射噪声抑制与核探测方法,并开发相应程序;通过分析辐射噪声信号特点,基于FPGA开发辐射噪声抑制和二维小波变换程序,输出辐射场清晰图像,并将图像分解为水平、垂直和对角线分量,探讨各个分量线性拟合统计的结果,确定线性拟合度最好的分量。结果表明:FPGA程序模块有效执行图像中的辐射噪声抑制和核探测功能,图像降噪后峰值信噪比(PSNR)提高约11 dB,对角线分量最能表征图像的辐射响应信息,对不同剂量率的线性拟合的线性度达到0.996 24。

【关键词】 现场可编程门阵列(FPGA); 辐射噪声; 噪声抑制; 剂量信息提取; 互补金属氧化物半导体(CMOS); 二维小波变换

Radiation noise suppression and dose information extraction method based on FPGA

XU Shoulong, HOU Zhixiong, WEI Cuiyue, ZOU Shuliang

(School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: In order to improve and advance the nuclear radiation detection and monitoring integrated technology based on pixel sensors, a radiation noise suppression and nuclear detection method leveraging the parallel advantages of FPGA was proposed, with corresponding programs developed. By analyzing the characteristics of radiation noise signals, radiation noise suppression and two-dimensional wavelet transform programs based on FPGA were developed to output clear radiation field images. The images were decomposed into horizontal, vertical, and diagonal components, and the results of linear fitting statistics for each component were investigated to identify the component with the best linear fit. The research results demonstrate that the FPGA program modules effectively execute radiation noise suppression and nuclear detection functions in images. After noise reduction, the peak signal-to-noise ratio(PSNR) of the images is improved by approximately 11 dB. The diagonal component is shown to best characterize the radiation response information of the images, achieving a linearity of 0.99624 in linear fitting for different dose rates.

Keywords: field programmable gate array (FPGA); radiated noise; noise suppression; dose information extraction; complementary metal oxide semiconductor (CMOS); two-dimensional wavelet transform

0 引言

伴随着核科学技术的发展,核安全问题越来越受到重视。日本福岛核事故发生以来,在核事故应急方面,如何实时监测辐射,快速准确获知核环境信息,成为热门研究方向^[1-2]。由于互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)像素传感器具有功耗低、可靠性、成品率高等优点,对电离辐射和可见光都具有敏感响应能力,结合现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)布线资源丰富,可重复编程和集成度高的特点,能够实时处理大量数据,并快速响应各种辐射事件。CMOS与FPGA的结合对核辐射探测监测一体化技术的发展提供了更多可能性。

近年来,像素传感器分析辐射检测视频监控器已成为一个突出的研究领域^[3]。CMOS具有更低的成本和更高的性能,广泛应用于各种传感器中^[4-5]。与电荷耦合器件探测器的分辨率和读出速度限制相比具有高能量分辨率和高帧率,是一种高效、通用且经济的替代解决方案^[6-7]。结合CMOS传感器和卷积神经网络的辐射监测方法也成为一个热门的研究课题,提高了复杂图像的处理能力^[8-9]。另一方面,使用基于微分采样权重和多帧平均的去噪方法,可显著提高去噪性能,增强传感器的动态范围^[10-11]。随着人工智能的发展,在强辐射环境下噪声处理的研究中,使用深度学习和其他算法模型进行降噪处理的研究得到了广泛关注^[12-13]。在之前的研究中,基于对辐射噪声抑制和检测的研究,提出一种并行处理方法,使用噪声替换算法抑制噪声,并通过二维小波变换分析图像信号。该方法可生成清晰的辐射图像并实时测量辐射剂量率,降低算法的复杂性和成本,提高降噪效率,具有较低的计算成本和较高的实时处理能力^[14]。随着FPGA硬件计算能力的不断提高,在核研究中的应用越来越多^[15],其基于高效的并行流水线处理能力,在高精度探测器等领域发挥了重要作用^[16-17];得益于其设计简单、性能高、功耗低等特点,广泛应用于各种光谱仪和脉冲系统中,有效提高了能量分辨率和峰值抑制能力^[18-19]。由于FPGA的低成本和可重构性,通过特定的冗余硬件架构设计,核反应堆系统的容错性和可靠性得

到提高^[20]。结合FPGA和CMOS的传感器用于辐射图像检测,充分利用其低成本和高可靠性的特点,是目前研究最多的核辐射检测和监测系统^[21-22]。然而,目前的核辐射探测和监测系统面临着几个挑战,包括算法复杂性高、无法准确表征辐射场信息以及由于辐射暴露导致图像清晰度低,所有这些都阻碍了辐射场关键信息的有效识别。

现有研究虽然聚焦于辐射图像的去噪技术,但仍存在算法复杂度过高、辐射场信息表征不足及高剂量下图像劣化等问题,鉴于此,笔者将提出一种基于FPGA的噪声抑制与辐射剂量信息提取方法,为提升核环境探测装备的实时处理能力提供新的技术支持。

1 基于FPGA的噪声抑制与信息提取方法

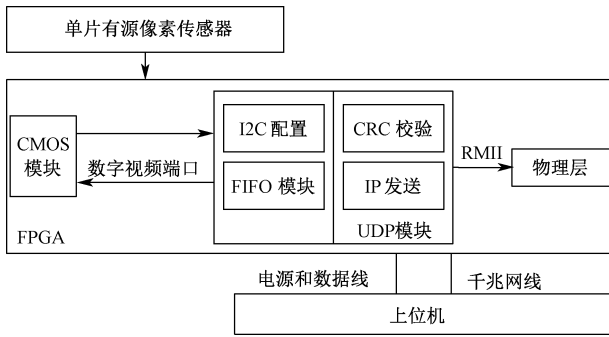
1.1 基于FPGA的辐射试验样品

本文采用的FPGA硬件具备6~150 K逻辑元件和6.3 Mb嵌入式存储器,8个高速收发器,可提供3.125 Gbps的数据速率,通过串行总线接口进行编程。摄像头模块选用1/4英寸CMOS有源像素传感器,有效像素阵列为649 H×489 V。使用Quartus II软件进行噪声抑制与辐射探测的代码编写,将代码写入FPGA开发板中,在软件中配置好各引脚及千兆网传输协议,并在FPGA开发板上运行程序。

图1为FPGA试验系统工作流程。系统包括摄像头、FPGA器件、上位机3部分。摄像机采集图像信息后传入FPGA处理器中进行降噪处理,再将降噪后的图像通过千兆网传输到上位机的软件中,通过上位机进行数据的保存和显示,同时,在FPGA运行二维小波变换程序中,将辐射噪声图像分解为水平、垂直、对角线3个分量的像素值并保存在上位机中。FPGA读取CMOS有源像素传感器所采集的图片信息,依靠先进先出模块将CMOS的数字视频端口信号缓存起来,执行代码将图像进行降噪处理及二维小波变换后,通过RMI协议将数据发送到物理层,再由千兆网将降噪后的图像和3个分量传输到上位机显示和保存,设定增益为42 dB,积分时间为1/25 s。

1.2 辐射试验条件与试验方案

图2为试验系统及实物。试验采用圆柱状⁶⁰Co



注:内部集成电路(Integrated Circuit, I2C);先入先出队列(First Input First Output, FIFO);循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC);网际协议(Internet Protocol, IP);用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP);简化媒体独立接口(Reduced Media Independent Interface, RMII)。

图1 FPGA 试验系统工作流程

Fig. 1 FPGA test system workflow

γ 射线放射源,特征能量分别为 1.17 和 1.33 Mev, 活度为 3.33×10^{14} Bq, 辐射试验在室温环境下进行, 环境温度为 22 °C。每 2 个 FPGA 开发板为一组, 一个写入原始图像采集程序, 另一个写入噪声抑制程序, 分别放入 2 个遮光的暗箱内并连接网线及电源线, 将 2 个暗箱放入辐射室进行辐射试验。选取剂量率在 51.6~265.22 Gy/h 的 5 个点进行试验, 通过 FPGA 实施对所采集到的噪声图像进行降噪处理及小波包变换, 研究图像的降噪及探测方法。摄像头实时图像通过千兆网网线输出到上位机, 采用软件记录并采集到上位机硬盘中。

1.3 图像数据处理方法

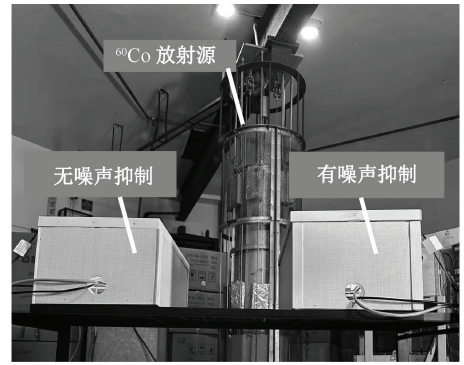
采用边缘检测算法及峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 2 种评价方法评估图像的降噪效果; 线性拟合小波包变换所得到的水平、垂直和对角线 3 个分量的统计值, 对比获得 3 个分量中线性拟合度最高的分量, 使用此分量表征辐射剂量信息。边缘检测算法在辐射噪声检测中能够识别辐射噪声是否影响图像边缘信息。PSNR 是图像去噪最普遍的评估指标, PSNR 的值越大, 说明图像去噪效果越好。此方法计算公式为:

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg\left(\frac{255}{\text{MSE}}\right) \quad (1)$$

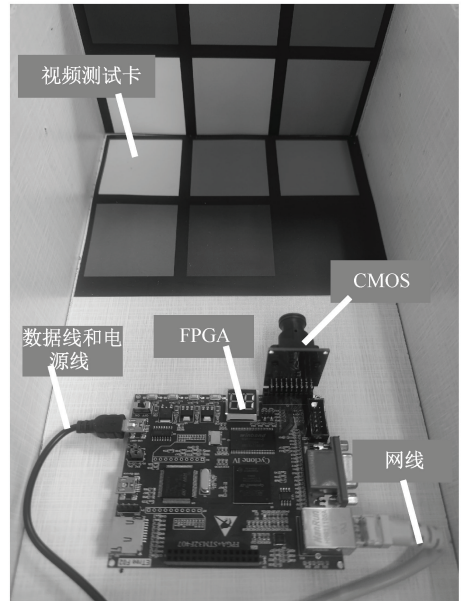
式中 MSE(Mean-Square Error) 为每个像素灰度值的平均值。其计算公式如下:

$$\text{MSE} = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{i \in \Omega} (\hat{X}(i) - X(i))^2 \quad (2)$$

式中: $X(i)$ 为理想图像(不受噪声污染); $\hat{X}(i)$ 为去除噪声后获得的图像; Ω 为图像的像素坐标集



(a) 试验环境



(b) 系统实物

图2 试验环境及系统实物

Fig. 2 Experimental environment and physical system diagram

(行数×列数)。

使用 Haar 小波进行小波变换, Haar 小波变换后的图像信息不会丢失及损坏, 采用逆变换可得到完全一样的原图像, Haar 小波可表示为:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < \frac{1}{2}, \\ -1 & \frac{1}{2} \leq t < 1, \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\psi(t)$ 为 Haar 小波变换的母函数; t 为时间变量。

通过基于 Haar 小波函数的变换图像, 得到图像的水平、垂直、对角线 3 个分量, 便于表征辐射剂量率变化。

1.4 辐射噪声抑制与探测方法的 FPGA 实现

分析噪声图像可得出视频图像中的辐射噪声的特点,在相同的辐射剂量率照射条件下,视频彩色图像数据流中的单个像素在每一帧中受到辐射影响的概率极低,很少在相同像素位置的多个连续帧中同时存在噪声,因此,提出基于中值滤波的噪声替代抑制算法并编写 FPGA 代码。

从噪声视频图像中提取 n 帧的图像,并进行噪声抑制与辐射剂量表征并行处理。噪声抑制模块中,处理从辐射场噪声视频图像中的 n 帧图像,将每个图像中的红、绿、蓝各个颜色通道单独提取出来组成单一灰度矩阵,分别比较这 n 帧中各色通道的灰度矩阵;选择图像中各位置的最小像素值,得到新的

图像矩阵,再逐一将各个颜色通道进行中值滤波;将中值滤波后的各通道灰度矩阵组合成新的图像,通过网线输出到上位机的软件上显示。核探测模块中,提取 n 帧图像,将图像分为行向量和列向量存储到寄存器中,分别使用 Haar 小波变换分解图像的行向量和列向量,计算像素值得均值和差值,将图像分解为水平、垂直和对角线 3 个分量,通过对比不同分量的图像信息情况,选取线性拟合度最好的分量来表示辐射信号,在有效消除视频图像中辐射噪声的同时进行图像处理,实现辐射探测和辐射噪声抑制的并行处理,获得清晰视频图像的同时进行剂量信息提取。图 3 为辐射噪声抑制与核探测 FPGA 程序。

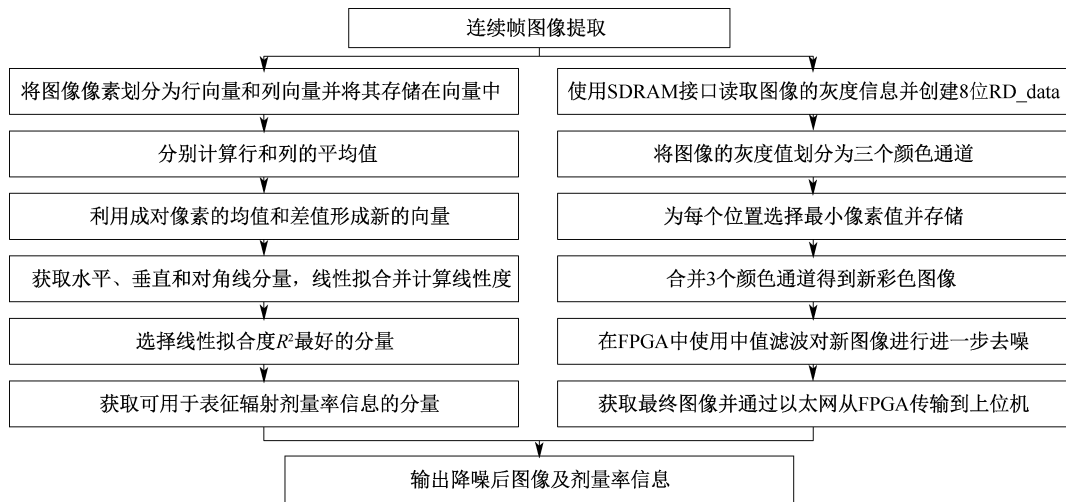


图 3 辐射噪声抑制与核探测 FPGA 程序

Fig. 3 FPGA logic flowchart for radiation noise suppression and nuclear detection

2 噪声抑制与信息提取结果分析

2.1 数据处理方法辐射噪声及噪声抑制效果

图 4 为受到辐射噪声影响的视频图像及其边缘检测图。辐射剂量率为 153.41 Gy/h,在此剂量率条件下,可以看出,图像区域出现很多亮斑,严重影响图像信息的精确识别。使用 Matlab 软件中的 Sobel 算子进行处理得到图所展示边缘检测图,图像明显看到大量噪声斑点,而边缘检测图可以清晰描绘出基本的信号轮廓,但轮廓周围存在大量斑点,噪声斑点会被边缘检测算法识别出来且具有较大的面积,辐射噪声对正确识别图像信息造成严重干扰。

根据辐射噪声产生与叠加的原理,通过中值滤波结合噪声替代算法进行噪声抑制,不同帧条件下降噪后的效果及边缘检测如图 5 所示。分别设置帧数阈值 n 为 2、3、5 帧。由图 5 可知:当阈值帧数设

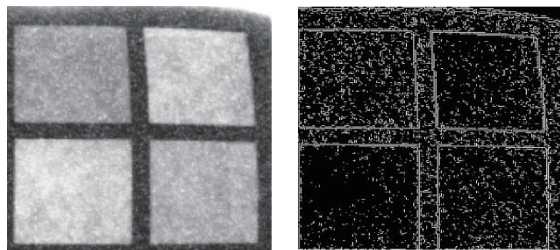


图 4 受辐射噪声及边缘检测

Fig. 4 Video image affected by radiation noise and edge detection output

置为 2 帧时,图像仍有明显噪声存留;阈值帧数设置为 3 帧时,图像区域基本无亮斑噪声存在;当阈值帧数设置为 5 帧时,可看出大部分噪声被消除,可以完全分辨出图像信息。

从图 5 可以看出,阈值帧数设置为 2 和 3 帧时,白色噪声明显减少,但图像信息仍存在严重干扰,当阈值帧数设置为 5 帧时,辐射噪点影响几乎被全部

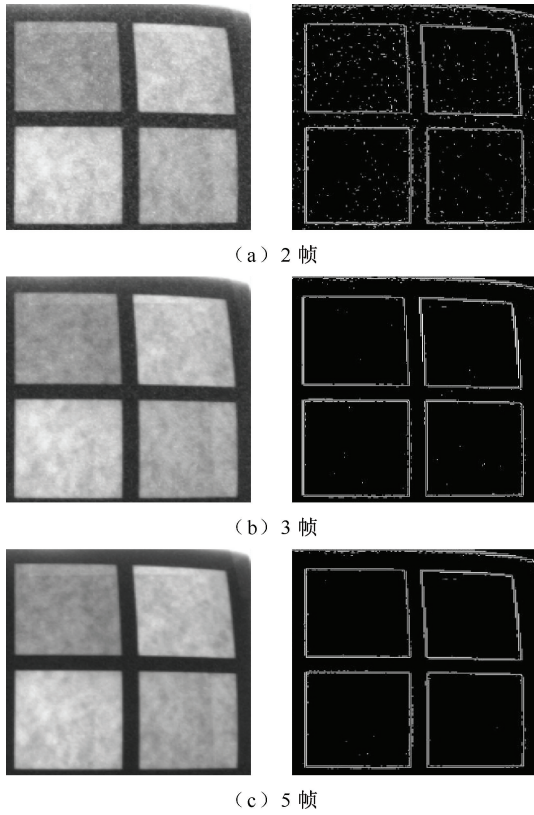


图 5 不同帧降噪效果及边缘检测

Fig. 5 Noise reduction results and different frame denoising edge detection of different frames

消除,图片边缘信息被清晰检测出来,说明降噪算法对噪声产生很好的抑制效果。

图 6 为降噪前后图像的 PSNR 比,从图 6 可以看出,随着剂量率的不断升高,降噪前的 PSNR 明显下降,在进行降噪算法处理前,噪声图像的 PSNR 在 28~30 dB 范围内,降噪后的图像 PSNR 随着提取帧数的增多而升高,最大值可达到 39 dB,PSNR 明显提高,比降噪前提升 11 dB,试验数据最大误差在 0.15 dB。

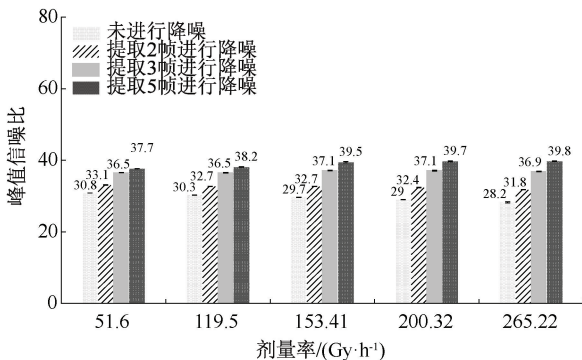


图 6 降噪前后 PSNR 对比

Fig. 6 Comparison of PSNR before and after denoising

2.2 辐射图像探测结果

利用 FPGA 中二位小波包变换程序模块,叠加 10 帧图像信息。经过二维小波包变换后,水平、垂直和对角线的高频分量的直方图分布如图 7 所示。3 个高频分量均对剂量率的变化十分敏感。当剂量率为 265.22 Gy/h 时,图像所含的灰度信息最多,随着辐射剂量率逐渐减小,3 个高频分量中的灰度信息逐渐减小,在灰度值[0, 10)内,辐射剂量率的变化在灰度分布上并不明显,而当灰度值在 (70, 100],各分量曲线出现较大波动,不适合表征辐射剂量率的变化,灰度值在 [10, 70]时,不同辐射剂量率的灰度曲线产生分层,说明此部分最有利于表征辐射剂量率的变化。其中,对角线分量的灰度值在 [10, 70]时,剂量率的变化分布与水平分量

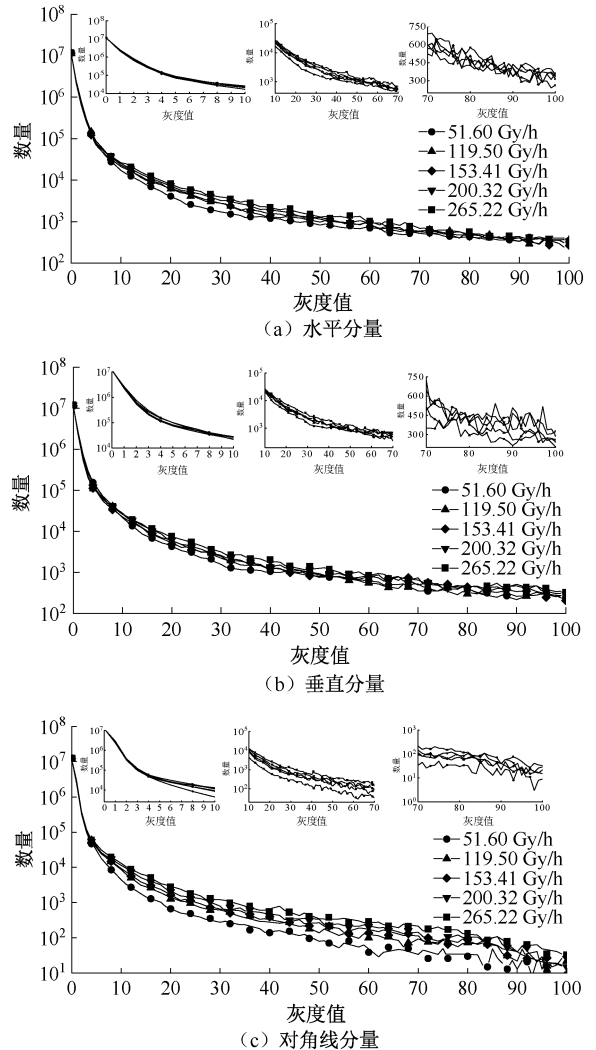


图 7 不同剂量率照射条件下高频信息的像素灰度分布

Fig. 7 Pixel value distribution of high-frequency information under different dose rate conditions

分量相比更为明显。

高频分量与辐射剂量率之间的线性拟合关系如图8所示。由图8可知:水平、垂直和对角线分量的响应信号统计值均随辐射剂量率的增加而增多。各分量与辐射剂量率之间的线性拟合参数见表1。由表1可知:垂直分量的线性度最差,而对角线分量的线性度是最高的, $R^2 = 0.99624$,因此,对于所选试验对象,对角线分量最能准确表征辐射剂量率,最适合实现辐射场剂量信息提取。

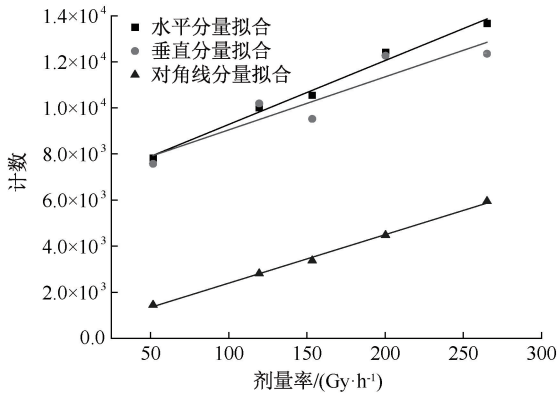


图8 不同剂量率下图像各分量的线性关系

Fig. 8 Linear relationship of image components at different dose rates

表1 各分量与辐射剂量率之间的线性拟合参数
Table 1 Linear fitting parameters between each component and radiation dose rates

分量	截距		斜率		R^2
	值	标准误差	值	标准误差	
水平	6 510.093 68	312.472 68	27.725 5	1.798 39	0.983 38
垂直	6 745.975 18	933.113 11	23.010 09	5.370 4	0.812 72
对角	293.553 17	112.116 11	21.030 61	0.645 27	0.996 24

2.3 噪声抑制与剂量信息提取结果讨论

基于FPGA以噪声替换算法结合中值滤波的辐射噪声抑制与监测方法,兼具低计算复杂度与高实时处理能力。与深度学习相比,无需大规模数

据集训练,适合在计算资源受限的复杂辐射环境(如核电站和核应急场景)中快速部署,CMOS图像传感器的高可靠性,保证对复杂图像的适应性,FPGA的低功耗特性进一步增强了系统在极端条件下的处理能力。与基于深度学习或数字信号处理的去噪方法相比,文中算法在辐射噪声抑制效果(PSNR提升约11 dB)的基础上,显著降低了算法复杂性,提升了实时性和硬件可行性,并能并行表征辐射场信息,实现剂量信息提取的功能,这种低成本、高效率的方案更契合核辐射监测的实际需求。

3 结论

1) 提出基于FPGA的辐射噪声抑制和辐射信息提取的并行处理方法,通过设计带中值滤波的辐射噪声替代算法来进行噪声抑制,并通过二维小波变换寻找最能表征辐射信息的分量。

2) 带中值滤波的辐射噪声替代程序模块能够有效抑制辐射噪声,当提取帧数为5帧时,图像中辐射噪声基本被抑制,降噪前后图像PSNR提高了11 dB,验证了在FPGA上实现噪声抑制的可行性。

3) 通过二维小波变换将辐照图像分解为水平、垂直和对角线3个分量,其中,垂直分量的线性度最差,而对角线分量的线性度是最高的,对角线分量信息最能准确表征辐射剂量率。

4) 通过FPGA出色的并行处理能力,将噪声抑制与辐射信息探测结合在一起,实现输出核辐射场环境下清晰图像的同时进行剂量信息提取。后续将从软件端入手改进算法,优化FPGA硬件架构,提高输出图像的帧率等指标。

4 致谢

衷心感谢中国原子能科学研究院提供 ^{60}Co 射线放射源。

参考文献

- [1] 孙美兰,邹树梁,徐守龙,等. 基于动态贝叶斯网络的乏燃料后处理核应急情景分析[J]. 中国安全科学学报,2024,34(10): 214-220.
SUN Meilan, ZOU Shuliang, XU Shoulong, et al. Nuclear emergency scenario analysis for spent fuel reprocessing based on dynamic Bayesian network[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(10): 214-220.
- [2] 罗中兴,左莉,罗昆升,等. 核辐射监测全沉浸式VR训练系统设计与实现[J]. 中国安全科学学报,2023,33(1): 130-135.
LUO Zhongxing, ZUO Li, LUO Kunsheng, et al. Design and implementation of a fully immersive VR training system for

- nuclear radiation monitoring[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(1): 130–135.
- [3] XU Shoulong, ZOU Shuliang, HAN Yongchao, et al. Study on the availability of 4T-APS as a video monitor and radiation detector in nuclear accidents [J]. *Sustainability*, 2018, 10(7): DOI:10.3390/su10072172.
- [4] JIANGI Wei, YAMN C, RYAN S, et al. Time-gated and multi-junction SPADs in standard 65 nm CMOS technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(10): 12 092–12 103.
- [5] JOO Jieun, LEE Myungjae, PARK Sungmin. A CMOS optoelectronic receiver IC with an on-chip avalanche photodiode for home-monitoring LiDAR sensors[J]. *Sensors*, 2021, 21(13): DOI:10.3390/s21134364.
- [6] STAECK S, KAYSER Y, BAUMANN J, et al. Towards soft X-ray fluorescence measurements in the laboratory using a laser-produced plasma source and a complementary metal-oxide semiconductor detector [J]. *Journal of Instrumentation*, 2021, 16(3): DOI:10.1088/1748-0221/16/03/P03033.
- [7] WANG Jeffreygan, MA Ruihua, WU Xing, et al. Infrared detection through CMOS detector enabled by reversible luminescence quenching of quantum dots[J]. *AIP Advances*, 2023, 13(2): DOI:10.1063/5.0137649.
- [8] NAIR V, RADHAKRISHNAN A, CHITHRA R, et al. Memristive pixel-CNN loop generate for CNN generalisations [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2023, 22: 120–125.
- [9] YAN Zhangfa, ZHANG Zhaohui, XU Shuyu, et al. Nuclear radiation detection based on the convolutional neural network under public surveillance scenarios[J]. *Open Physics*, 2022, 20(1): 49–57.
- [10] LIU Yalei, XU Jiangtao, ZHA Wanbin, et al. A 1/f noise optimized correlated multiple sampling technique for complementary metal oxide semiconductor image sensor[J]. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2023, 51(12): 5 529–5 542.
- [11] YAMAMOTO K, SAKAMOTO N, YURIMOTO H. Analysis of the noise properties of a solid-state SCAPS ion imager and development of software noise reduction[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2010, 42(10/11): 1 603–1 605.
- [12] LUO Yifu, FU Liping, JIA Nan, et al. MSR-Net: a novel noise elimination method for real CMOS image sensor[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 78 714–78 725.
- [13] LI Menglin, PENG Jia, JING Yuyu, et al. Synaptic feature of quantum dot light-emitting diodes for visualization of learning process[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2024, 15(41): 10 334–10 340.
- [14] XU Shoulong, DONG Hanfeng, QIN Zhiwei, et al. Parallel processing of radiation measurements and radiation video optimization[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 46 870–46 887.
- [15] ZHANG Dongliang, WU Wenchen. Radiation environment-constrained FPGA reinforcement technology and reliability research utilizing error control coding[J]. *IEEE Access*, 2024, 12:74 737–74 750.
- [16] CHEN Zhong, HU Tianlong,HAO Yuya, et al. High-speed phase structured light integrated architecture on FPGA[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 71(1): 1 017–1 027.
- [17] GIORDANO R, TORTONE G, VINCENZI D, et al. Neutron-irradiation testing of FPGA-embedded hadron fluence sensors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2023, 70(5): 774–781.
- [18] PAUL R K, DAS A, DHARA P, et al. Implementation of FPGA based real-time digital DAQ for high resolution, and high count rate nuclear spectroscopy application[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18(7): DOI:10.1088/1748-0221/18/07/P07042.
- [19] DONG Junqi, WANG Zhu, LIAO Yuan, et al. A fully digital coincidence doppler broadening spectrometer based on FPGA[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023, 18(4): DOI:10.1088/1748-0221/18/04/P04036.
- [20] FARIAS M S, NEDJAH N, DE ARVALHO P V R. Active redundant hardware architecture for increased reliability in FPGA-based nuclear reactors critical systems [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2022, 90: DOI:10.1016/j.micpro.2022.104495.
- [21] OGINO N, ARIMOTO M, SAWANO T, et al. High-speed readout system of X-ray CMOS image sensor for time domain astronomy[J]. *Journal of Instrumentation*, 2024, 19(1): DOI:10.1088/1748-0221/19/01/C01006.
- [22] LIU Wei, JI Long, QIU Haiyang, et al. Research on a back-illuminated CMOS sensor for LUV imaging[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, 17(8): DOI:10.1088/1748-0221/17/08/T08004.

作者简介: 徐守龙 (1988—),男,甘肃嘉峪关人,博士,副教授,主要从事核安全探测、监测技术等方面的研究。E-mail:xusl@usc.edu.cn。