

中文引用格式:黄有骏,游琮宇,徐守龙,等. 基于视觉图像中电离辐射响应特征的核辐射探测[J]. 中国安全科学学报,2026,36(2): 102-109.

英文引用格式:HUANG Youjun, YOU Qiongyu, XU Shoulong, et al. A nuclear environment monitoring method based on ionizing radiation response characteristics in visual images[J]. China Safety Science Journal, 2026,36(2):102-109.

基于视觉图像中电离辐射响应特征的核辐射探测*

黄有骏¹高级工程师, 游琮宇², 徐守龙^{**2}副教授, 侯志雄², 彭国文²教授

(1 中国核动力研究设计院 核反应堆技术全国重点实验室, 四川 成都 610213;

2 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.issn1003-3033.2026.02.0619

基金项目:国家自然科学基金资助(11905102);核反应堆技术全国重点实验室运行基金资助(LRSDT12023302)。

【摘要】 为实时识别动态变化环境中的辐射源,提出一种基于视觉图像中电离辐射响应特征的核环境监测方法。通过试验分析电离辐射对视觉图像的响应特征,包括像素值的均值、方差、偏度和峰度等统计参数,量化特征数据与辐射剂量率的关系,验证拟合的高精度线性相关性;利用二维小波包分解分析视频图像中高频分量,提出一种提取复杂背景中辐射响应信号的算法,精准监测核环境中 γ 射线辐射剂量率。试验结果表明: γ 射线辐射剂量率在51.61~479.24 Gy/h范围内,响应事件数量与剂量率呈显著线性关系,拟合曲线的相关系数分别达到0.998 9和0.999 3;在像素响应特征方面,均值、方差随剂量率增大显著增加,而偏度与峰度表现为指数下降趋势;当像素值阈值为130时,拟合结果的线性度最佳;通过二维小波包分解,抑制了复杂背景干扰,实现了在复杂工况下对剂量率的稳定表征。

【关键词】 视觉图像; 电离辐射; 辐射响应; 辐射探测; γ 射线; 剂量率; 像素传感器

A nuclear environment monitoring method based on ionizing radiation response characteristics in visual images

HUANG Youjun¹, YOU Qiongyu², XU Shoulong², HOU Zhixiong², PENG Guowen²

(1 National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan 610213, China; 2 School of Resources, Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

Abstract: This article proposes a nuclear environment monitoring method based on ionizing radiation response characteristics in visual images. Through experimental analysis of the response characteristics of ionizing radiation to visual images, including statistical parameters such as mean, variance, skewness, and kurtosis of pixel values, the relationship between feature data and radiation dose rate was quantified, and the high-precision linear correlation of the fitting was verified. A two-dimensional wavelet packet decomposition is used to analyze high-frequency components in video images, and an algorithm is proposed

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0102-08; 收稿日期:2025-09-12; 修稿日期:2025-12-20

** 通信作者: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。

to extract radiation response signals from complex backgrounds, achieving accurate monitoring of gamma ray radiation dose rates in nuclear environments. The experimental results indicate that within the gamma ray radiation dose rate range of 51.61 Gy/h to 479.24 Gy/h, there is a significant linear relationship between the number of response events and the dose rate. The correlation coefficients of the fitted curves are 0.998 9 and 0.999 3, respectively. In terms of pixel response characteristics, the mean and variance significantly increase with increasing dose rate, while skewness and kurtosis show an exponential downward trend. In addition, the experiment verified the influence of setting the pixel value threshold on radiation dose rate measurement. When the pixel value threshold is 130, the linearity of the fitting results is optimal. By using two-dimensional wavelet packet decomposition, the statistical analysis of high-frequency components in the image has further improved the accuracy of dose rate characterization, especially achieving maximum linearity in the diagonal components. This method can efficiently extract radiation response information in complex environments, achieve precise monitoring of gamma ray dose rates in nuclear environments, and provide technical support for emergency response to nuclear leaks and assessment of radioactive areas.

Keywords: visual image; ionizing radiation; radiation response; radiation detection; gamma ray; dose rate; pixel sensor

0 引言

核事故与放射源异常事件对环境与公众安全构成长期而复杂的威胁。事故早期阶段,对电离辐射强度、空间分布及其演化过程的快速感知是实施应急响应与风险管控的关键环节。如何在极端辐射环境下稳定获取场景画面并同时给出辐射场定量表征,成为核安全监测技术的重要方向。传统核辐射探测方法难以满足现代对核设施安全监测的需求^[1]。有源像素传感器是一种硅基阵列结构的半导体阵列像素传感器,电离辐射敏感,具有耐辐射、工艺成熟、成本和功耗低、成品率高、不易活化和二次废物量小的优点^[2-3],在辐射探测与成像方面也具有较大应用潜力^[3-5]。这种基于视觉图像的核辐射探测方法在极端核辐射环境中具有显著优势,能够在动态变化环境中实时识别辐射源,提供更广泛、更直观的监测数据,特别是在复杂、危险区域,展现了较强的应用潜力。

有源像素传感器对电离粒子敏感,表现在像素图像中出现白色亮斑状的辐射响应事件^[6-7]。典型响应事件具有粒子甄别特性,表现在网格图中的尺寸、峰值和形状的差异^[8-9]。由于响应事件的特征参数与辐射剂量率存在线性关系^[10-12],可通过采用合适的算法处理像素值,从而利用有源像素传感器测量 X 和 γ 射线照射率^[13-14],以及进行低能 γ 射线的辐射剂量率探测^[15]。PANACCIONE^[16]、YAN Zhangfa^[17]等提出了利用互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)

摄像头初步验证通过监控摄像头进行核辐射探测的可行性,并提出一种有效的视频处理算法,探测了静态场景下的核辐射事件。赵娟等^[18]研究了基于辐射探测器阵列反演 γ 辐射源的位置信息,实现了对重要放射性部件的精确定位监控。LIN Jiang 等^[19]使用标准 γ 源建立了神经网络剂量率预测模型,检测剂量率在 $\mu\text{Sv/h}$ 级别。CORZI 等^[20]利用低成本传感器构建了便携 γ 射线剂量计。BONNETT 等^[21]研究了 CMOS 有源像素传感器的多种电离粒子响应特征。然而,尽管国内外学者在 CMOS 有源像素传感器辐射响应机制、剂量率表征及应用拓展方面已取得大量成果,但仍停留在低阶统计特征层面,复杂背景下信号提取精度与实时性不足,高剂量率试验数据和阈值优化研究也相对欠缺。

鉴于此,笔者拟针对强核环境缺少直观有效的监测手段的需求,在阐明视觉图像中 γ 射线电离辐射响应信号特征基础上,通过研究 γ 射线辐射环境下的视频测试图像以及真实环境图像数据,提出辐射响应信号特征识别方法与统计算法,分析 γ 射线响应贡献表征方法和份额,形成基于视觉图像中响应信号特征分析的核环境探测与预警方法,以期提高我国核设施安全监测能力。

1 有源像素传感器的辐射响应特征

试验使用有源像素传感器相机模组,其像元尺寸为 $2.2\ \mu\text{m} \times 2.2\ \mu\text{m}$,具有 2 592H $\times$ 1 944V 的有效像素分辨率,对应的物理尺寸为 6 mm(水平) $\times$ 4 mm(垂直)。传感器输出信号支持 8~10 位数字格式。

试验过程中,去除传感器表面覆盖的玻璃保护层,使 α 射线能够射入传感器硅像素阵列中。数据采集及处理通过 iCamera 51 单片机实现,并通过通用串行总线(Universal Serial Bus, USB)高速接口实现图像数据从传感器模组到个人计算机的传输,采样频率为 25 Hz。

辐射试验采用 ^{60}Co 圆柱状 γ 射线放射源进行,特征能量分别为 1.17 MeV 和 1.33 MeV,放射源平均活度为 90 kCi,辐射场不均匀度小于 5%,受照样品辐射剂量率在 50 Gy/h 至 500 Gy/h。辐射剂量率通过测量总剂量除以辐照时间获得,辐照总剂量利用辐射变色薄膜剂量计记录并用分光光度计测得。环境温度为 22~26 ℃,试验过程中,传感器模组放置于有稳定光源照明的箱内,隔绝环境光线的干扰。试验系统如图 1 所示。

图 2 为剂量率 51.61 Gy/h 辐照条件下,积分时间固定为 0.25 ms 时,不同增益参数下 20×20 像素

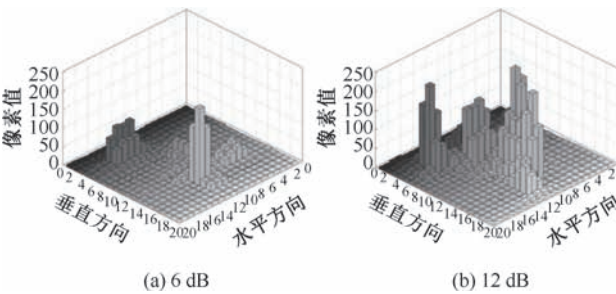


图 2 增益对响应事件分布特征影响(51.61 Gy/h,0.25 ms)

Fig. 2 Impact of gain changes on the distribution characteristics of response events(51.61 Gy/h,0.25 ms)

图 3 为剂量率 51.61 Gy/h 辐照条件下增益固定为 6 dB 时,不同积分时间下 100×100 像素区域的响应柱状图及直方图。由图 3 可知:随着积分时间的增加,区域内的响应事件数量显著增多,直方图整体向高灰度方向移动。表明较长的积分时间能够积累更多入射 γ 射线产生的电荷,从而使辐射响应更加明显。然而,过长的积分时间会导致多个事件信

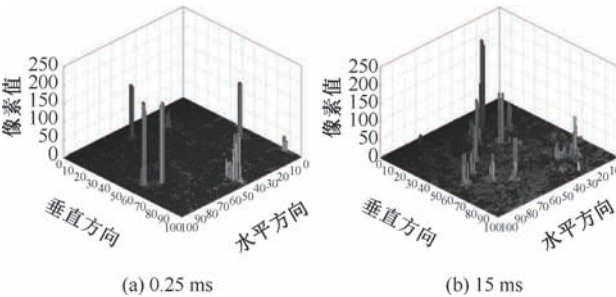


图 3 积分时间对响应事件分布特征影响(51.61 Gy/h, 6 dB)

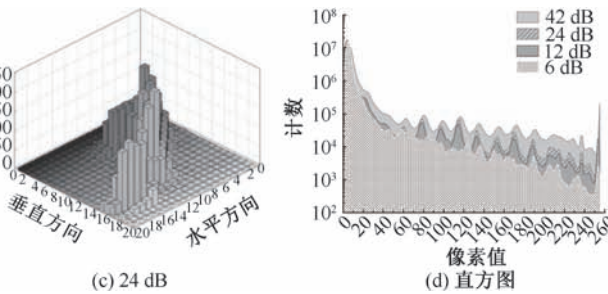
Fig. 3 Impact of integration time changes on the distribution characteristics of response events(51.61 Gy/h, 6 dB)



图 1 试验系统

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

区域的响应柱状图及直方图。试验结果表明:随着增益的增加,像素响应显著增强,直方图整体向高灰度值方向移动,表明较低能量沉积事件在高增益下也能被识别。与此同时,过高的增益导致部分像素信号达到饱和,直方图高灰度端出现堆积,使得能量沉积差异的信息被压缩。这表明增益在提高灵敏度的同时,也会放大噪声并降低动态范围。这是因为 γ 射线入射产生的电荷信号经放大后更易区分,但当信号超过像素容量上限时,出现饱和失真。因此,增益参数对响应灵敏度和线性度具有双重影响,合理的增益设置对于保证剂量率测量的准确性至关重要。



号在同一像元内叠加,使得像素值分布逐渐趋于饱和,直方图在高灰度端出现压缩现象,降低了不同能量沉积事件的分辨能力。这一现象表明:积分时间对灵敏度和分辨率具有双重影响,即适度延长积分时间有助于提高低剂量事件的检测率,但过长的积分时间会带来信号叠加与饱和失真。

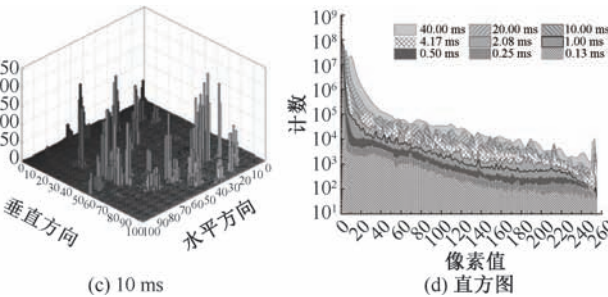


图 4 为增益固定为 6 dB、积分时间为 40 ms 条件下,不同剂量率辐照时 100×100 像素区域的响应柱状图及直方图。可以看出,随着剂量率的提高,区域内响应事件数量显著增加,更高的剂量率将导致响应信号几乎覆盖整个像素阵列敏感区域。直方图分布也随剂量率升高整体向高灰度方向移动,且曲线逐渐趋于平滑。表明在高剂量率下,像素受电离辐射能量沉积产生的电荷大幅增加,使得更多像素

进入高响应状态。这是因为 γ 射线注量越大,单位时间内沉积在像素结区的载流子数量越多,导致平均像素值和整体灰度水平迅速上升。当剂量率过高时,部分像素出现饱和,像素间差异被削弱,因此直方图呈现出平滑化趋势。因此,高剂量率下的饱和效应也会降低统计特征的分辨力。这一结果表明:在强场监测应用中,应结合阈值与参数优化,以避免因饱和导致的剂量率判别误差。

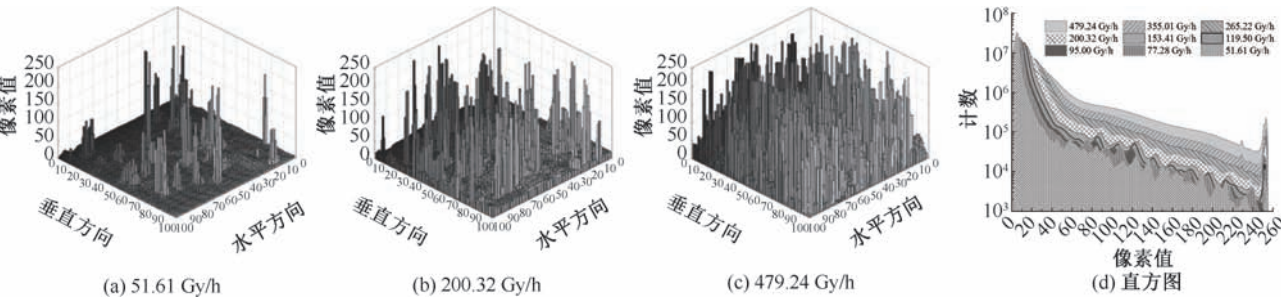


图 4 剂量率对响应事件分布特征影响 (40 ms, 6 dB)

Fig. 4 Impact of dose rate on the distribution characteristics of response events (40 ms, 6 dB)

2 基于电离辐射响应特征的核辐射探测

图 5 描述了响应信号数据特征与剂量率的特征关系,数据特征包括均值、方差、偏度和峰度随剂量率变化的曲线关系,计算如下:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{1}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \tag{2}$$

$$S = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \tag{3}$$

$$K = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4}{\sigma^4} - 3 \tag{4}$$

式中: μ 为均值; n 为像素的总个数; x_i 为第 i 个像素的像素值; σ 为标准差; σ^2 为方差; S 为偏度; K 为峰度。其中,峰度计算式中减去 3 的原因是将正态分布的峰度标准化为 0。

响应信号数据特征与剂量率的特征关系如图 5 所示,随着剂量率增加,图像均值显著增大,表明整体亮度水平提高;方差随剂量率升高而增大,表明像素间差异增强,图像对比度提升。偏度随剂量率上升逐渐降低,表明分布由偏斜趋于对称,反映出亮区像素占比增加。峰度同样随剂量率升高而下降,表

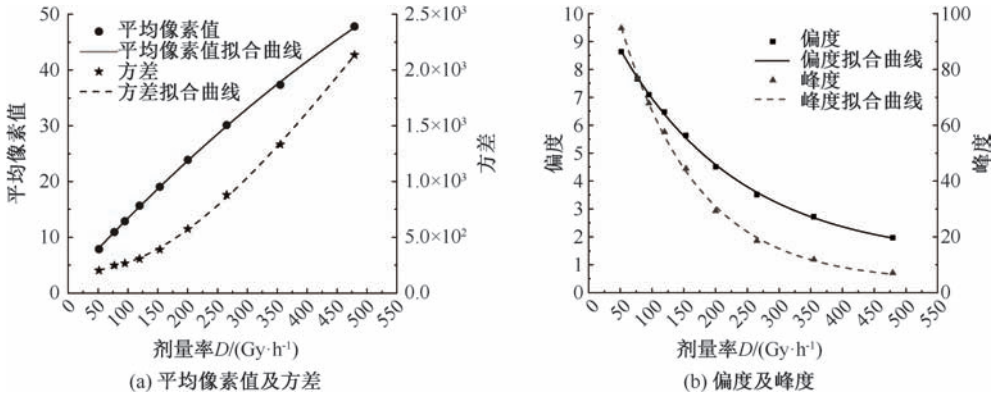


图 5 响应信号数据特征与剂量率的特征关系

Fig. 5 Relationship between response signal data characteristics and dose rate characteristics

明像素值分布逐渐展宽,不再集中于单一灰度区间。这些现象符合辐射作用下电荷沉积不断增强、亮斑事件在像元阵列中大范围出现的物理规律。进一步拟合表明:均值和方差与剂量率呈高度线性的多项式关系,拟合优度分别达到 0.998 9 和 0.999 4;偏度和峰度与剂量率的变化符合指数下降特征,拟合优度分别为 0.999 3 和 0.998 9。结果表明:均值、方差能够有效表征整体剂量率水平,而偏度、峰度对响应分布形态的敏感性更强,二者结合能够更全面反映 γ 射线辐射场下图像的统计特征。

图 6 展示了直方图不同像素值区间在增益、积分时间以及剂量率变化条件下的敏感性分析结果。可以看到,当像素值 <20 或 >250 时,对增益变化的敏感性均低于 75%;而在 150~250 区间内,直方图分布对增益变化最为敏感。对于积分时间的影响,像素值大于 30 的区间普遍表现出较高敏感性,表明较长积分时间会显著增强中高灰度像素的响应。就剂量率而言,像素值大于 40 的区间敏感性均超过 95%,表现出与辐射强度高度一致的响应关系。结合本底噪声分析可知:在无辐照条件下传感器平均像素值约为 17,因此,大于噪声基底的像素区间能够有效表征电离辐射的真实响应。

分析结果表明:像素值位于 150~250 区间时,不仅远高于噪声水平,而且尚未进入饱和区,因而保留了更多能量沉积信息。该区间内像素值随剂量率变化的拟合线性度达到 0.999 4,高于其他区间。表明中高灰度像素既避免了低灰度区间受噪声干扰的不足,又规避了高灰度端的饱和压缩问题,能够在灵敏度与稳定性之间实现较好的平衡。由此可见:合理选择像素响应区间,尤其是 150~250 这一范围,对于提高剂量率监测的精度和可靠性具有重要意义。

由于辐照期间帧图像直方图各区间对剂量率的

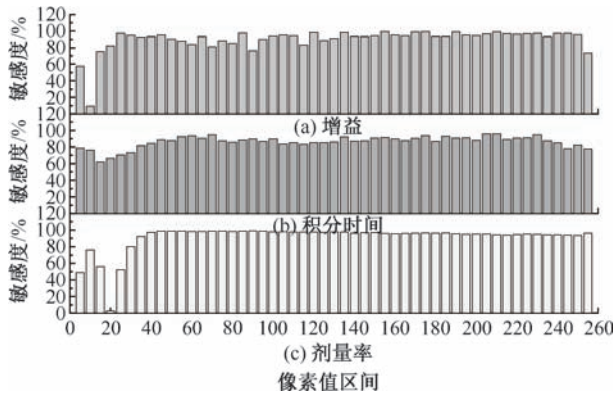


图 6 直方图各区间敏感性分析
Fig. 6 Sensitivity analysis between different regions in the histogram

变化表现出不同的敏感性,像素值大于“基底”阈值的直方图各区域数据受增益和积分时间参数设置影响显著。图 7 给出了不同像素值阈值条件下连通响应事件数量与剂量率之间的关系及其拟合结果,由图 7 可知:当阈值较低时,统计到的连通像素数量包含了部分噪声信号,使得剂量率相关性不够稳定;而当阈值逐渐提高至 100 以上后,响应事件数量随剂量率呈现明显上升趋势,表现出良好的线性关系。进一步比较拟合方式发现,线性拟合的相关系数随阈值变化先下降后上升,但在阈值超过 250 后急剧降低,表明过高阈值会导致有效事件丢失。相比之下,指数拟合在阈值大于 130 时能够保持较高的线性度,其结果更符合电离辐射事件在像素阵列中产生的簇集响应特征。这是因为 γ 射线入射后往往在局部区域产生连续像素的电荷沉积,形成亮斑或簇集。如果阈值过低,容易把暗电流波动或噪声点误判为辐射事件;如果阈值过高,则会遗漏部分真实事件。综合试验结果表明:在文中传感器条件下,像素阈值设置在 130 附近时,既能有效剔除噪声,又能

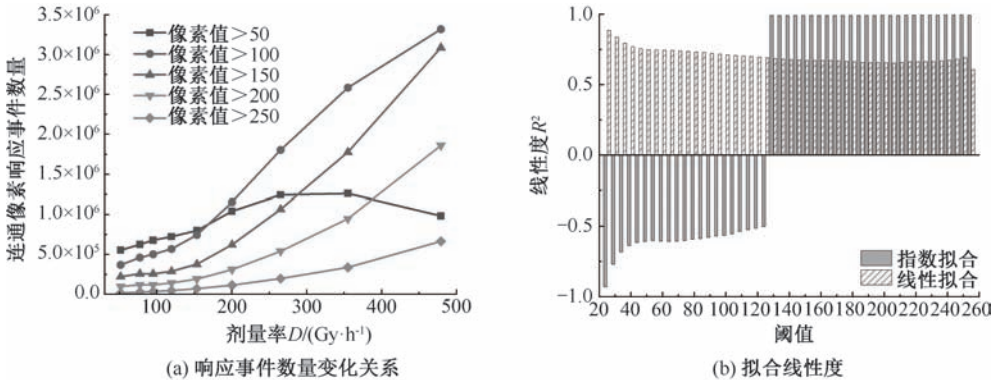


图 7 不同阈值拟合分析
Fig. 7 Fitting analysis with different thresholds

完整保留辐射响应信号,此时指数拟合得到的剂量率关系最为稳定和准确,且该方法适用于所有有源像素传感器的阈值标定。

当有源像素传感器在核环境中采集视觉图像时,辐射响应事件将受到视觉图像背景信息的影响。图 8 给出了在不同背景值条件下的响应事件三维柱状图和热力图。由图 8 可知:尽管背景值增大会显著覆盖部分辐射事件的灰度信息,但单个响应事件仍然表现为连通像素区域的局部突变,其灰度值明显高于背景水平,因此能够与周围像素区分开来。

随着背景值的升高,事件与背景的对比度减弱,事件边界趋于模糊,但依然保留了统计特征上的差异。这是由于 γ 射线入射后在局部像素区域形成电荷簇集,其幅值往往超过背景亮度的随机波动,因此在图像分布上表现为高灰度连通区。虽然背景信号会削弱事件的对比度,但基于灰度突变与空间连通性的特征仍可有效识别辐射响应。表明:即使在较复杂的图像背景条件下,电离辐射事件依然能够通过特征差异实现提取,这为在实际核环境监测中开展视频级响应检测提供了可行性支撑。

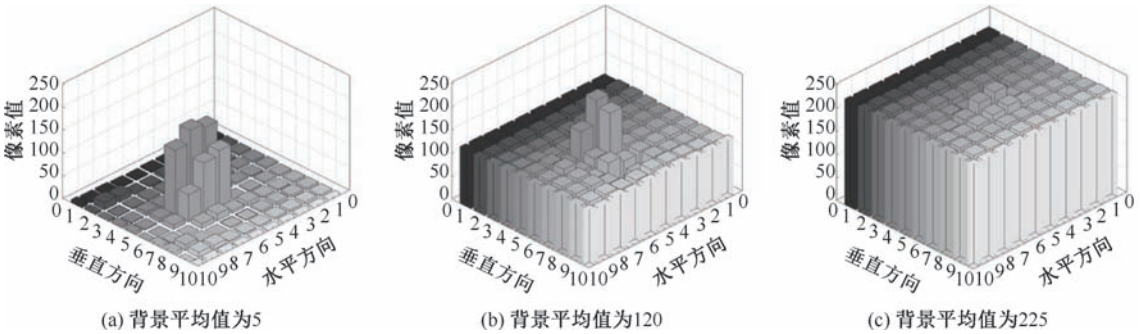


图 8 不同背景值条件下响应事件

Fig. 8 Response events under different background value conditions

图 9 为视频图像经二维 Haar 小波包一阶分解后,不同高频分量(水平、垂直和对角)对剂量率变化的表征能力。图 9a 给出了在不同像素阈值条件下,响应事件数量随剂量率变化的指数拟合线性度。结果表明:水平分量和垂直分量的线性度随阈值变化呈现先减小后增大的趋势,表明这 2 个方向的高

频分量在部分阈值区间仍受到噪声或局部结构信息的干扰。而在对角分量中,当阈值超过 100 后,拟合线性度保持在较高水平,并在超过 175 时不再出现有效拟合结果,反映出对角分量在该阈值范围内对辐射响应的敏感性最强。

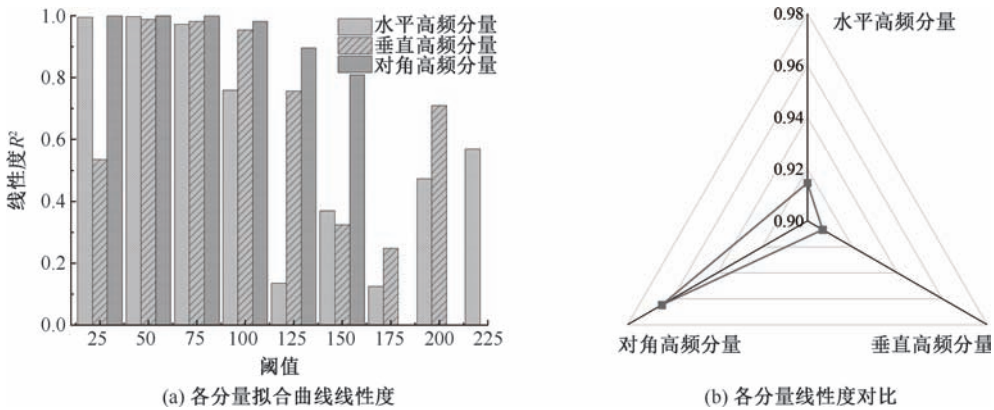


图 9 二维小波包分解后各分量对剂量率变化的表征关系

Fig. 9 Characterization relationship between dose rate changes of each component after two-dimensional wavelet packet decomposition

图 9b 进一步对比了 3 类高频分量的最大线性度,可以看出,虽然三者均能在一定程度上表征剂量率的变化,但对角分量的相关性最优,拟合优度接近 0.999。这一结果表明: γ 射线入射在像素阵列中产

生的电荷沉积分布往往呈现各向异性的随机簇集特征,对图像的局部纹理扰动最显著地体现在对角方向。因此,对角高频分量能够更敏锐地捕捉辐射引起的细微结构变化,从而在复杂背景下保持更高的

信噪比和稳定性。

综上所述,通过引入二维小波包分解,将原本受背景干扰的整体灰度统计转化为高频结构特征的提取,使得剂量率与统计量之间的对应关系更清晰、更稳健。相比传统方法仅依赖均值或事件计数,文中方法能够在复杂背景和多种干扰条件下保持高精度剂量率测量,尤其适合于核事故现场的实时视频监控。换言之,小波分解不仅是一种数学工具,更是将物理响应特征映射到频域的一种机制创新,显著提升了基于视觉图像的核环境监测能力。

3 结 论

1) 像素均值和方差与 γ 射线剂量率呈高度线

性关系,偏度和峰度随剂量率增加呈指数下降特征,证明多维统计特征能够全面反映辐射对图像灰度分布的影响。像素值在 150~250 范围内对剂量率变化最为敏感,阈值设置在 130 时能够兼顾噪声抑制与信号保真,拟合效果最佳。增益和积分时间对像素响应具有显著影响,合理调节可有效提升灵敏度,但过高会导致饱和失真。

2) 基于视觉图像中电离辐射响应信号的分布特征,能够有效解决复杂背景和高剂量率条件下信号提取困难的问题。研究结果表明:该方法能够在核事故应急与放射性区域安全评估中实现实时、准确和鲁棒地监测,为像素传感器在辐射环境中的工程化应用提供新的技术路径。

参 考 文 献

- [1] 杜平,张玉敏,朱春来.核辐射探测装备和技术的发展趋势[J].中国科技信息,2012(13):46-47.
DU Ping, ZHANG Yumin, ZHU Chunlai. The development of overseas radioactive detecting technology[J]. China Science and Technology Information, 2012(13): 46-47.
- [2] BATTAGLIA M, MANZARI V, RIEDLER P, et al. R&D paths of pixel detectors for vertex tracking and radiation imaging[J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research A, 2013, 716: 29-45.
- [3] SRISKARAN V, ALOZY J, BALLABRIGA R, et al. High-rate, high-resolution single photon X-ray imaging: Medipix4, a large 4-side buttable pixel readout chip with high granularity and spectroscopic capabilities [J]. Journal of Instrumentation, 2024, 19(2): DOI: 10.1088/1748-0221/19/02/P02024.
- [4] BAUDOT J, DULINSKI W, WINTER M, et al. Photon detection with CMOS sensors for fast imaging[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2009, 604(1/2): 111-114.
- [5] 刘泽东. X 射线直接成像的 CMOS 有源像素图像传感器研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
LIU Zedong. Study on CMOS active pixel sensor for direct X-ray imaging[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [6] HIRVONEN L, SUHLING K. Photon Counting imaging with an electron-bombarded pixel image sensor[J]. Sensors, 2016, 16(5): DOI: 10.3390/s16050617.
- [7] 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.
- [8] PÉREZ M, LIPOVETZKY J, HARO M, et al. Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2016, 827: 171-180.
- [9] YAMAMOTO S, YOSHINO M, NAKANISHI K, et al. Sub-micrometer real-time imaging of trajectory of alpha particles using GAGG plate and CMOS camera[J]. Journal of Instrumentation, 2023, 18(10): DOI: 10.1088/1748-0221/18/10/T10003.
- [10] PÉREZ M, HARO M, SIDELNIK I, et al. Commercial CMOS pixel array for beta and gamma radiation particle counting[C]. Micro-nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA): 2015 Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA). IEEE, 2015: 11-16.
- [11] 魏清阳,王振鹏,戴甜甜,等.基于静态场景下不遮光 CMOS 摄像头的核辐射探测[J].原子能科学技术,2017,51(1):175-179.
WEI Qingyang, WANG Zhenpeng, DAI Tiantian, et al. Nuclear radiation detection based on un-covered CMOS camera under static scene[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 175-179.
- [12] XU Shoulong, ZHAO Fang, ZOU Yang, et al. Low dose rate γ -ray detection using a MAPS camera under a neutron radiation environment[J]. Optics Express, 2021, 29(22): 34 913-34 925.

- [13] 王芳,王明远,马春旺,等. CMOS在辐射分布与照射量率直接探测中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(10): 1 278–1 281.
WANG Fang, WANG Mingyuan, MA Chunwang, et al. Direct application of CMOS in radiation distribution and exposure rate detection[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, 33(10): 1 278–1 281.
- [14] WANG Xu, ZHANG Songling, SONG Guoxiang, et al. Remote measurement of low-energy radiation based on ARM board and ZigBee wireless communication[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(1): DOI: 10.1007/s41365-017-0344-2.
- [15] WANG Fang, WANG Mingyuan, LIU Yufang, et al. Obtaining low energy γ dose with CMOS sensors[J]. Nuclear Science & Techniques, 2014: DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.060401.
- [16] PANACCIONE W, SHI Zhifang, KANDLAKUNTA P, et al. Testing of an organic metal halide perovskite for fast neutron detection[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2024, 1064: DOI: 10.1016/j.nima.2024.169340.
- [17] YAN Zhangfa, WEI Qingyang, HUANG Gangqin, et al. Nuclear radiation detection based on uncovered CMOS camera under dynamic scene[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 956: DOI: 10.1016/j.nima.2019.163383.
- [18] 赵娟, 高正明. 基于辐射探测器阵列的单个 γ 源定位方法[J]. 核技术, 2016, 39(1): 33–37.
ZHAO Juan, GAO Zhengming. Location method of a single gamma source based on the detectors array[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(1): 33–37.
- [19] LIN Jian, WANG Feipeng, WANG Jinkai, et al. An investigation of γ radiation detection with a CMOS imaging sensor[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): DOI: 10.1038/s41598-024-75096-8.
- [20] CORZI D L, LIPOVETZKY J, BERISS M G. Development of an Internet of Things (IoT) embedded open-source gamma-ray detector using CMOS image sensor technology[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2025, 14(2): 197–202.
- [21] BONNETT M, HELACONDE R, SONCCO C, et al. Particle detection performance and Geant 4 simulation with low-cost CMOS technology[J]. Journal of Instrumentation, 2025, 20(6): DOI: 10.1088/1748-0221/20/06/P06004.

作者简介: 黄有骏 (1985—),男,四川成都人,硕士,高级工程师,主要从事反应堆核辐射探测方面的研究。E-mail:drsi-d404-hyj@npic.ac.cn。