

固态图像传感器的电离辐射响应均匀性

徐守龙^{1,2*}, 邹树梁^{1**}, 韩永超^{3***}, 刘明忠⁴, 曲延涛³, 张韬懿⁵

¹南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;

²清华大学工程物理系, 北京 100084;

³中国原子能科学研究院辐射安全研究所, 北京 102413;

⁴中核新能源投资有限公司, 北京 100037

⁵北京控制工程研究所, 北京 100094

摘要 研究并对比了 6 类电荷耦合器件和互补金属氧化物半导体图像传感器的辐射响应均匀性。设计辐射实验, 对像素阵列中响应信号在不同统计区域内的像素值增量平均值和非均匀度进行分析与讨论, 重点研究了各类固态图像传感器像素阵列全局、区域和代表像元的辐射响应均匀性。实验结果表明: 在稳态 γ 射线辐射场辐照条件下, 帧图像中的响应信号增量并非固定值; 像素阵列各区域内响应信号的均匀性不因辐照剂量率的变化而变化, 对于相同的图像传感器, 辐射在任意帧图像中产生辐射响应信号的分布与像素阵列中任意像素在多帧图像中出现辐射响应的分布相同, 但由于传感器的本底噪声存在差异, 单个像元、区域像素的统计结果与全局存在偏差。本研究为提高基于图像传感器的 γ 射线辐射探测技术, 实现无遮光条件下在线辐射探测提供了理论依据和数据支持。

关键词 传感器; 电离辐射响应; 非均匀性; γ 射线; 像素

中图分类号 TN946.1; TN65; TL99

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0728007

Ionizing Radiation Response Uniformity of Solid-State Image Sensors

Xu Shoulong^{1,2*}, Zou Shuliang^{1**}, Han Yongchao^{3***}, Liu Mingzhong⁴,
Qu Yantao³, Zhang Taoyi⁵

¹*School of Resource Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;*

²*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

³*Department of Radiation Safety, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

⁴*China Nuclear New Energy Investment Co., LTD., Beijing 100037, China;*

⁵*Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China*

Abstract Herein, the radiation response uniformities of six types of charge-coupled devices and complementary metal-oxide-semiconductor image sensors are studied and compared. Irradiation experiments are performed to investigate the average incremental pixel values and nonuniformities of radiation response signals in different regions of the pixel array. The radiation response uniformities of the global pixel array, regional pixels, and typical pixels in various solid-state image sensors are mainly studied. Results show that the incremental pixel value of the frame image under a steady-state gamma-ray irradiation is not a fixed value, and the uniformity of the radiation response signal in each region of pixel array is not affected by the radiation dose rate. For the same image sensor, the distribution of the radiation response signal in any frame image is the same as the radiation response distribution of any pixel, which is from the pixel array, in the multi-frame image. However, there is a deviation in the statistical results across the typical pixels, regional pixels, and global pixel array due to the difference of the sensor background noise. This study provides a theoretical basis and data support for improving the technology of gamma-ray radiation detection based on image sensors and realizing real-time radiation detection without shading.

Key words sensors; ionizing radiation response; non-uniformity; gamma ray; pixel

OCIS codes 280.4788; 040.5160; 230.0040; 230.5160; 230.5170

收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-03-15; 录用日期: 2019-03-25

基金项目: 湖南省科技重大专项(2012FJ1007)

* E-mail: xusl@usc.edu.cn; ** E-mail: kane880630@hotmail.com; *** E-mail: hanyongchao@ciae.ac.cn

1 引 言

随着半导体工艺的发展, 固态图像传感器已拓展到了许多领域。图像传感器对 γ 射线具有明显的电离辐射响应能力, 表现为在传感器像素阵列中出现辐射响应事件^[1], 且响应信号与辐射剂量率之间存在线性关系, 因此可以利用图像传感器进行辐射探测^[2-5]。近年来, 研究人员对固态图像传感器性能的研究逐渐增多, 例如对其性能进行校准^[6]、红外成像^[7]以及降噪算法^[8]等方面的研究。在应用方面, 基于图像传感器的辐射探测技术在介入放射学中的个人受照剂量监测^[9-11]、带电粒子径迹探测^[12], 以及利用手机摄像头探测核辐射^[13]等方面的应用研究备受关注。为了进一步提高固态图像传感器的探测性能, 国内外学者陆续开展了图像传感器的 γ 射线电离辐射响应机理及探测方法方面的研究: 通过研究图像传感器对光子通量和能量通量的探测能力, 证实了其对剂量测量和能量测量均具有良好的线性响应^[14]; 基于扩展的拉莫定理数学方法, 通过提取少数载流子扩散长度、少数载流子寿命、最大空间电荷区宽度等参数, 研究了图像传感器中电离产生的电子空穴对在像元内的扩散特性^[15]; 采用阈值聚类算法对传感器采集的数据进行处理, 研究光子数量与电荷产生量之间的关系, 以及数据观测值与辐射剂量率测量值的关系, 并对比了脉冲与连续辐射场的响应差异^[16]。然而, 目前基于图像传感器的 γ 射线辐射探测技术和方法仅能满足如教学实验等低精度探测的要求^[17], 对 γ 射线的探测效率也非常低^[18], 存在的能量响应差异问题使对非单能射线进行探测时的能量分辨率较低^[19]。虽然经过抗辐射加固后的图像传感器能够应用于核事故等辐射环境的视频监控与辐射预警^[20-21], 但随着 γ 射线辐射剂量率的增大, 探测误差逐渐增大^[22]。利用连续高增益算法^[19]以及改进的减法-求和算法^[23]对噪声进行

过滤, 能够降低探测器的噪声, 进一步提高探测效率。但是, 由于 γ 射线与图像传感器像元材料相互作用的随机性, 像素阵列中各像元的辐射响应存在较大的非均匀性, 这一辐射响应的非均匀性差异既表现在像素阵列的空间分布上, 也表现在单个像元辐射响应的时间分布上^[5]。研究图像传感器的辐射响应的非均匀性是影响辐射场放射性水平探测精度的关键问题。

本文以 6 类不同工艺和参数的商用固态像传感器作为实验对象, 在分析本底噪声的基础上, 通过分析图像传感器像素阵列中响应信号在不同统计区域像素值增量的平均值和非均匀度, 研究并对比了各类固态图像传感器受到稳态场电离辐射后, 响应信号在时间和空间上的均匀性。本研究不仅为进一步开发基于图像传感器的 γ 射线辐射探测能力, 提高探测精度和效率提供了技术支持, 还为无遮光条件下实现固态图像传感器在线辐射探测提供了重要的理论依据。

2 实验准备

2.1 实验样品

在综合考虑固态图像传感器的工艺类型、工作模式、输出信号类型以及产品销量、成熟度的基础上, 选择两类电荷耦合器件 (CCD) 模拟图像传感器、两类互补金属氧化物半导体 (CMOS) 模拟图像传感器和两类 CMOS 数字图像传感器作为样品进行实验, 各类图像传感器参数如表 1 所示。为了避免电离辐射损伤对辐射响应信号的影响, 所有样品的辐照总剂量均小于 10 Gy。实验期间, 所有样品积分时间均设置为 0.04 s, 输出信号增益为 36 dB。关闭所有参数的自动调节功能。各类样品均经过遮光处理, 以避免可见光、紫外辐射和红外辐射对 γ 射线响应的干扰。

表 1 各类固态图像传感器的参数

Table 1 Parameters of various solid-state image sensors

No.	Type	Signal	Model	Resolution / (pixel \times pixel)	System on chip	Analog-to-digital converter / bit
1	CCD	Analog	Sony811	976 \times 582	EFFIO 4140	8
2	CCD	Analog	Sony673	976 \times 582	EFFIO 4140	8
3	CMOS	Analog	MT9V139	1305 \times 1049	FH 8520	8
4	CMOS	Analog	Sony imx238	976 \times 582	FH 8510	8
5	CMOS	Digital	AR0130	1280 \times 960	Hi 3518C	8
6	CMOS	Digital	OV9712	1280 \times 800	Hi 3518C	8

2.2 实验条件

实验采用单栅板式平面⁶⁰Co放射源,γ射线的能量分别为1.17 MeV和1.33 MeV,放射源平均活度为 2.516×10^{16} Bq,环境温度约为19℃,实验系统示意图如图1所示。图中PC为个人计算机,DC为直流电源,AC为交流电源。由于放射源体积远大于固态图像传感器样品,并且放射源的活度较大,辐射场的放射性水平较高,因此,可将辐射场视为均匀的稳态辐射场。实验系统包括辐射区域内的辐射实验部分和非辐射区内的信号储存传输、采集和处理部分。6个实验样品并排固定在木板上,并放置于由覆盖有遮光材料的聚氯乙烯泡沫板制作而成的实验暗箱内,以隔绝外界光线对实验的影响,实验暗箱

正对放射源栅板放置。图像传感器的输出数据通过超六类网线传输到硬盘录像机,硬盘录像机采用8通道混合型网络硬盘录像机(7816 HGH-F1/M, HikVision, 中国),采样频率为25 Hz,用于视频数据的实时采集和储存。采用1台12 V、20 A的直流电源对6类图像传感器和硬盘录像机供电。硬盘录像机采集的视频数据通过计算机进行处理,实验期间图像传感器接收画面中的辐射响应事件可通过监视器实时观察。实验时,将重铬酸银化学剂量计放置于实验暗箱内传感器位置,测量实验点的总吸收剂量,用总吸收剂量除以辐照时间即可获得辐射剂量率。本研究中采用的辐射实验剂量率为20.53 Gy/h和60.17 Gy/h。

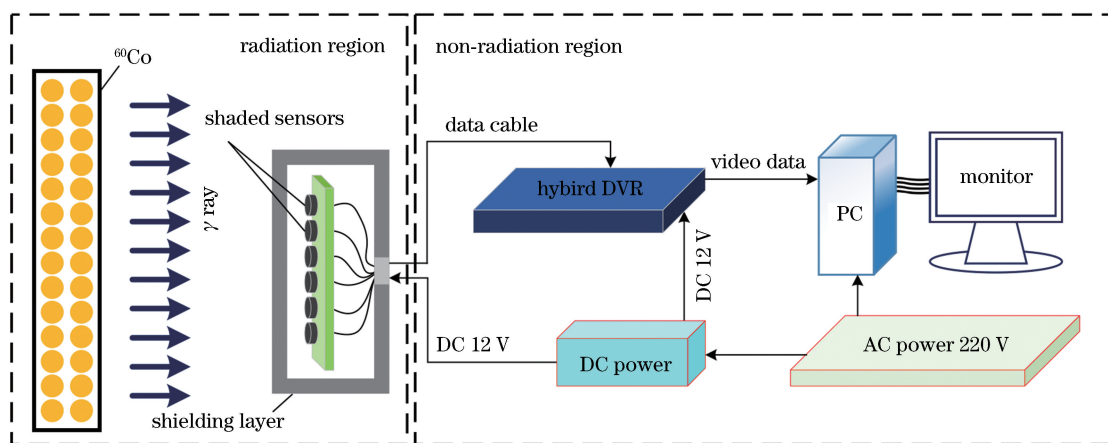


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system

2.3 实验数据处理

对硬盘录像机储存的实验数据进行处理,利用视频编辑软件对视频文件进行剪辑,并保存为JPEG图片格式。由于各传感器的分辨率不同,为了便于对比,在各类图像传感器采集的帧图像上,均选取像素阵列中心区域的 350×200 个像素,并划分为6个统计区域,每个区域内再选取本底噪声相同的1个像元作为代表,以所选区域左下角为原点,分别以(50,50)、(150,50)、(50,200)、(150,150)、(50,300)和(150,300)坐标位置的像元为代表像元。像素阵列统计区域及代表像元示意图如图2所示。

利用计算机软件将JPEG格式图片文件转化为数字矩阵,并进行数据处理。图像传感器各帧图像的本底噪声矩阵为

$$E_{(m \times n)} = \frac{1}{h} \sum_{l=1}^h E_{l(m \times n)}, \quad (1)$$

式中: m 、 n 为横纵像素矩阵坐标; h 为总帧数, $h = 4000$ frame; $E_{l(m \times n)}$ 为各帧图像的灰度矩阵, l 为图

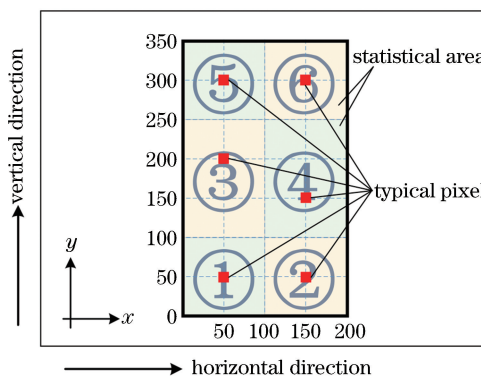


图2 像素阵列及特征像元选取示意图

Fig. 2 Schematic of pixel array and typical pixel selection image number.

第 l 帧图像中像素值增量的平均值为

$$S_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{iD} - I_i), \quad (2)$$

式中: V_{iD} 为辐射剂量率为 D 时,第 i 个像素的像素值; I_i 为第 i 个像素的本底像素值; N 为像素数量。

图像传感器像素值的非均匀度为

$$R_{\text{NUD}} = \frac{1}{V_D} \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{i=1}^N (V_{iD} - V_D)^2}, \quad (3)$$

式中: V_D 为统计像素的平均像素值。

3 实验结果与讨论

3.1 本底噪声

图 3 为 6 类 CCD 及 CMOS 图像传感器各像素本底噪声分布网格图。Sony673 和 Sony811 两款 CCD 图像传感器的本底噪声表现为一个较为平稳的噪声基底, 像素阵列中垂直方向的底部噪声较大, 极少像素出现噪声峰值。由图 3 中 4 类 CMOS 图

像传感器的本底噪声分布图可以看出: CMOS 图像传感器噪声均表现为独立的噪声峰, 但由于输出信号类型和信号处理系统有所差异, 故而 MT9V139 和 Sony imx238 的本底噪声较大, 而 AR0130 和 OV9712 的多数像元具有较小的本底噪声(部分像元噪声峰值较大), 噪声分布不均匀; AR0130 噪声分布表现为水平方向一排的像元噪声较大, 这可能是由这一排的位移寄存器噪声较大引起的。因此, 为了避免本底噪声的影响, 在研究特征像元因辐射响应引起的像素值变化以及辐射响应的均匀性时, 需要首先扣除像元像素值中本底噪声所占的份额。同时, 在对比研究单个像元在多个积分周期内和多

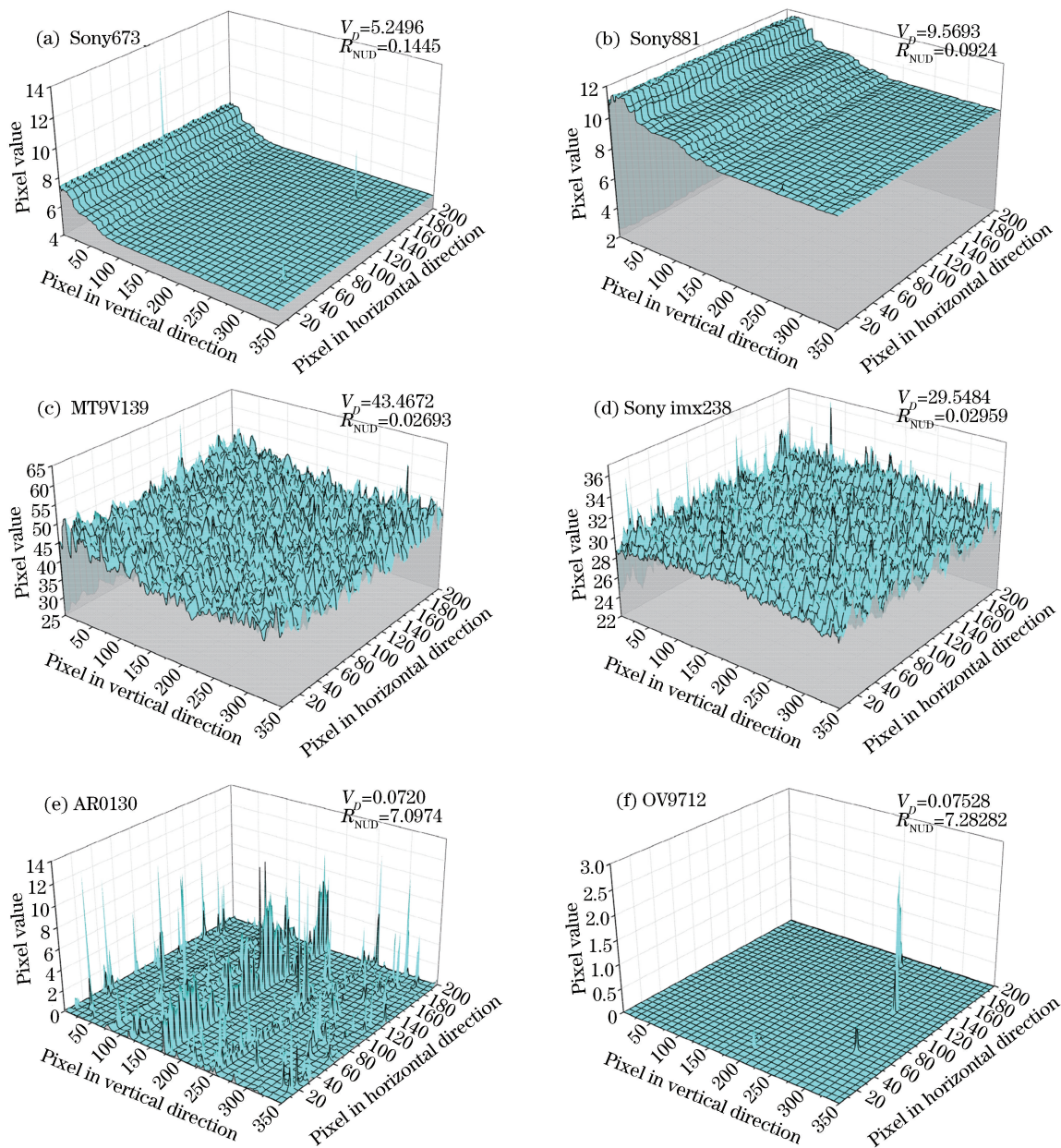


图 3 辐照前各类图像传感器的本底噪声网格图

Fig. 3 Meshes of background noise of six image sensors before irradiation

个像元在同一积分周期内电离辐射响应信号的均匀性时,两类模拟 CCD 图像传感器和两类模拟 CMOS 图像传感器应选择本底噪声接近噪声平均值的像元,而两类数字 CMOS 图像传感器应选择噪声最小的有效像元。各代表像元位置坐标及本底噪声如表 2 所示。

3.2 像素阵列全局辐射响应

图 4 为 6 类 CCD 及 CMOS 图像传感器在 21.53 Gy/h 和 60.17 Gy/h 剂量率辐照条件下各帧

图像电离辐射响应信号的像素值增量平均值(S_k)。由图 4 可知,CCD 和 CMOS 图像传感器各帧图像的像素值整体表现为:1)同类图像传感器不同帧图像像素值呈离散分布,且差异较大;2)380 帧图像中间歇性地出现峰值,峰值随机出现,频次与辐射剂量率相关,剂量率越大,峰值出现的频次越高;3)两类 CCD 图像传感器在 380 帧图像中的像素值离散程度小于 4 类 CMOS 图像传感器,其中 AR0130 及 OV9712 两类数字 CMOS 图像传感器输出信号的离散程度最大。

表 2 图像传感器所选区域像素及代表像元的像素均值

Table 2 Average pixel value of pixels in selected region and typical pixels

Location	Average pixel value					
	Sony673	Sony811	MT9V139	Sony imx238	AR0130	OV9712
Total	5.25	9.55	43.47	29.55	0.07	0.06
(50, 50)	5.18	9.45	43.44	29.51	0.02	0.04
(150, 50)	5.22	9.48	43.48	29.48	0.03	0.04
(200, 50)	5.43	9.64	43.50	29.66	0.02	0.03
(150, 150)	5.28	9.57	43.22	29.61	0.03	0.04
(50, 300)	5.18	9.62	43.68	29.51	0.02	0.04
(150, 300)	5.32	9.44	43.57	29.44	0.03	0.04

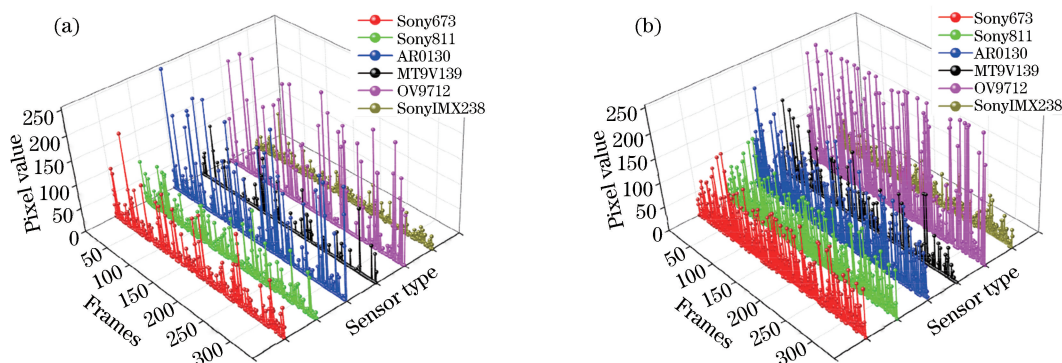


图 4 不同辐照剂量率下图像传感器帧图像像素值增量的平均值曲线图。(a) 21.53 Gy/h;(b) 60.17 Gy/h

Fig. 4 Average curves of incremental pixel values of frame images from image sensor under different irradiation dose rates.

(a) 21.53 Gy/h; (b) 60.17 Gy/h

表 3 为辐照条件下各传感器像素值增量的平均值及非均匀度,可见:1)各类图像传感器电离辐射响应信号的增量平均值有明显差异,其中模拟 CMOS 图像传感器像素值增量的平均值最小,数字 CMOS 图像传感器最大;2)CCD 和数字 CMOS 图像传感器的均值标准差相似,说明它们的响应信号具有相似的离散程度,其中数字 CMOS 的响应信号离散程度最大,这与图 4 反映的结果一致;3)虽然数字 CMOS 的离散程度最大,但其电离辐射响应信号的

均匀性最好,而模拟 CMOS 的均匀性最差,根据图 3 推断,图像传感器的本底噪声越大,电离辐射响应信号的均匀性越差,这可能是由于本底噪声淹没了部分响应信号,扣除本底并进行统计时遗失了这部分被淹没的信号信息;4)随着辐射剂量率增大,辐射响应信号表现出更好的均匀性,这是由于当辐射场放射性水平增大时,传感器像素阵列表面 γ 射线剂量率增大,入射粒子增多,响应信号出现的频次增多。

表 3 不同辐照剂量率下各传感器像素值增量的平均值及非均匀度

Table 3 Average incremental pixel value and non-uniformity of sensors under different irradiation dose rates

Dose rate / (Gy · h ⁻¹)	Data type	Sony673	Sony811	MT9V139	SonyIMX238	AR0130	OV9712
21.53	Pixel value	16.19	10.96	5.11	9.08	23.07	23.37
	Standard deviation	3.34	3.36	4.81	2.04	6.82	6.81
	Non-uniformity	0.11	0.19	0.49	0.23	0.09	0.09
60.17	Pixel value	41.26	37.78	11.57	21.05	56.82	55.80
	Standard deviation	2.64	3.02	4.79	1.82	3.73	5.01
	Non-uniformity	0.06	0.06	0.21	0.08	0.05	0.05

综上所述,无论是 CCD 还是 CMOS 图像传感器,γ 射线在独立帧图像中发生电离辐射产生的信号量增量差异较大。在分析响应信号与辐射剂量率对应关系时,单个帧图像所反映的信息并不准确。但在早期的研究中^[19]已证实,通过大量统计得到的图像传感器在稳态辐射场采集的电离辐射信号,能够稳定地反映辐射场的放射性水平。因此,在图像传感器像素阵列中,统计区域的选择和统计样本量是影响探测精度的关键。

3.3 像素阵列区域的辐射响应

图 5 为各类图像传感器在不同尺寸像素统计区域内响应信号的非均匀度柱状图,可见:对于 MT9V139 和 Sony imx238 两类模拟 CMOS 图像传感器,当统计区域为 4×7 时,非均匀度最小;当统计区域尺寸为 40×70 时,非均匀度略增大,之后随着统计区域进一步增大,非均匀度基本无变化。对于

其他 4 类图像传感器,非均匀度并不随统计区域尺寸而发生变化。对比图 5(a)~(b)可知,像素阵列各区域内响应信号的均匀性不受辐射剂量率的影响。

图 6 给出了 6 类 CMOS 及 CCD 图像传感器在各自 6 个不同统计区域内响应信号的非均匀度比例。可以看出,各类图像传感器不同区域辐射响应信号的非均匀度差异很小,最大差异小于 3%,且随着辐射剂量率增大,最大非均匀度差异小于 2%。这说明对于图像传感器像素阵列的任意局部区域,可以认为在稳态辐射场条件下,产生的电离辐射响应信号的均匀性几乎是相同的。结合图 5 的分析结论可知,对固态图像传感器来说,稳态辐射场产生的电离辐射响应信号在像素阵列空间上是均匀分布的,统计多个相同本底区域像素的响应信号能够获得与全局相同的统计结果。

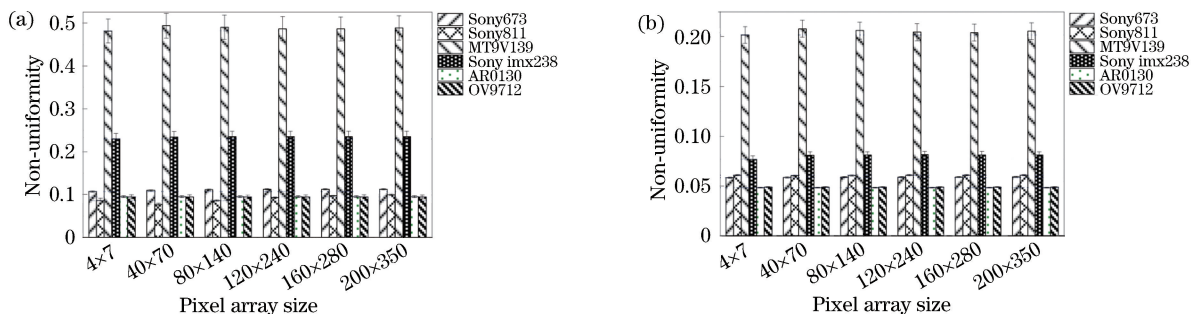


图 5 不同辐照剂量率下不同区域尺寸像素阵列响应信号的非均匀度柱状图。(a) 21.53 Gy/h; (b) 60.17 Gy/h

Fig. 5 Histograms of non-uniformities of radiation response signals at different pixel array sizes under different irradiation dose rates. (a) 21.53 Gy/h; (b) 60.17 Gy/h

3.4 代表像元辐射响应

表 4、5 分别为 4000 帧图像中 6 个代表像元产生响应信号的统计结果。由于所选代表像元的本底噪声接近各类图像传感器本底噪声的均值,可以认为 4000 帧图像中代表像元具有与全局相同的本底噪声。由表 4 中的对比数据可以看出,以 1 张帧图

像作为 1 个积分周期,各类固态图像传感器中独立像元在多个积分周期内的统计结果与全局像素的统计结果相近,且二者之间的偏差随着辐射剂量率的增大而明显减小。单个像元响应信号的统计结果普遍大于全局统计结果,其中 Sony811 和 Sony imx238 传感器之间的偏差最大。表 5 中各类固态

图像传感器代表像元在 4000 个积分周期内出现响应信号的均匀性与全局像素的统计结果基本相同，

且随着辐射剂量率的增大,代表像元与全局像素响应信号的均匀性、偏差均减小。

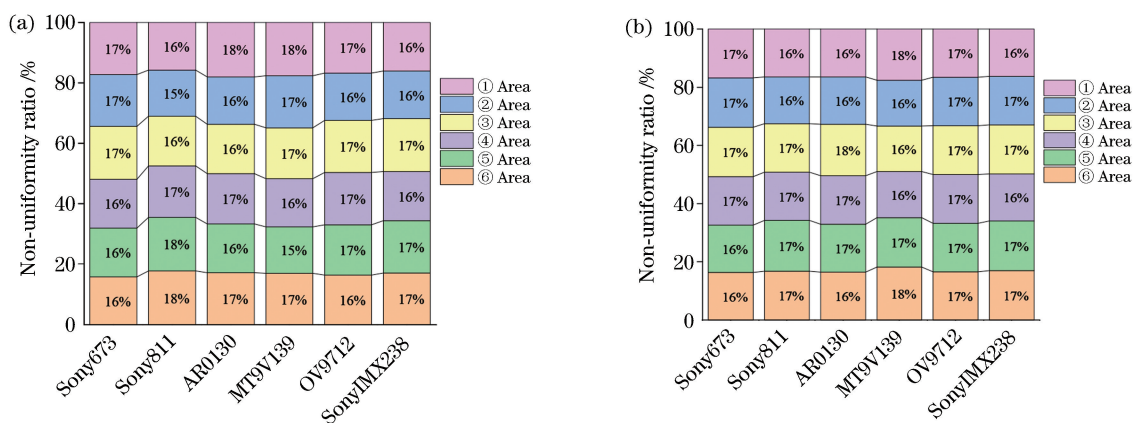


图 6 不同辐照剂量率下像素阵列内各区域响应信号的非均匀度比例图。(a) 21.53 Gy/h;(b) 60.17 Gy/h

Fig. 6 Stacked columns of non-uniformities of radiation response signals in different areas of pixel array under different irradiation dose rates. (a) 21.53 Gy/h; (b) 60.17 Gy/h

表 4 不同辐照剂量率下代表像元与全局像素的像素值统计结果

Table 4 Statistical results of pixel values of typical and global pixels under different irradiation dose rates

Dose rate / (Gy · h ⁻¹)	Data type	Pixel value					
		Sony673	Sony811	MT9V139	Sony imx238	AR0130	OV9712
21.53	6 typical pixels	18.28	13.18	23.67	7.93	24.64	10.43
	Total pixels	16.19	10.96	23.07	5.11	23.37	9.08
	Deviation / %	12.91	20.26	2.60	55.19	5.43	14.87
60.17	6 typical pixels	43.67	40.59	58.02	14.81	58.21	22.42
	Total pixels	41.26	37.78	56.82	11.57	55.80	21.05
	Deviation / %	5.84	7.44	2.11	28.00	4.32	6.51

表 5 不同辐照剂量率下代表像元与全局像素的非均匀度统计结果

Table 5 Statistical results of non-uniformity of typical and global pixels under different irradiation dose rates

Dose rate / (Gy · h ⁻¹)	Data type	Non-uniformity					
		Sony673	Sony811	MT9V139	Sony imx238	AR0130	OV9712
21.53	6 typical pixels	0.13	0.12	0.09	0.49	0.09	0.16
	Total pixels	0.11	0.10	0.09	0.49	0.09	0.18
60.17	6 typical pixels	0.05	0.05	0.04	0.21	0.05	0.08
	Total pixels	0.06	0.06	0.05	0.21	0.05	0.08

从表 4、5 中数据的对比分析结果可以看出,独立像元在多个积分周期内的统计结果与全局像素的统计结果相近。但由于固态图像传感器像素阵列内各像元的本底噪声存在差异,独立像元不能完全代表全局像素。当以均值作为本底时,统计结果往往会出现正向偏离,即单个像元在多个积分周期内的统计结果大于全局,且不同类型传感器之间的差异较大。然而,单个像元在多个积分周期内响应信号

的均匀性与全局像素的统计结果相似,说明当固态图像传感器受到电离辐射时,响应信号在时间上分布是均匀的,单个像元在多个积分周期内的统计值与多个像元在同一积分周期内的统计值与全局像素的统计结果近似相等。但前提是统计样本量足够使统计结果收敛。因此,对于稳态辐射场,各类固态图像传感器对电离辐射的响应在时间和空间上是均匀的,但由于传感器本底噪声的差异,单个像元、区域

像素的统计结果与全局像素的统计结果存在偏差。

4 结 论

通过设计辐射实验研究了 6 类 CCD 和 CMOS 图像传感器像素阵列中,响应信号在不同统计区域的像素值增量平均值和非均匀度。在分析本底噪声的基础上,分别对各类固态图像传感器像素阵列全局、区域和代表像元的辐射响应进行实验研究,并得到如下结论:

1) γ 射线在独立帧图像中发生电离辐射产生的信号量增量差异较大,单个帧图像所反映的信息并不准确。图像传感器像素阵列中的统计区域和统计样本空间是影响探测精度的关键。

2) 像素阵列各区域内响应信号的均匀性不会因辐射剂量率的变化而改变,统计多个相同本底区域像素的响应信号能够获得与全局相同的统计结果。

3) 对于稳态辐射场,各类固态图像传感器对电离辐射的响应在时间和空间上都是均匀的,但由于传感器本底噪声的差异,单个像元和区域像素的统计结果与全局像素的统计结果存在正向偏差。

综上所述,利用固态图像传感器电离辐射响应信号表征辐射场时,本底噪声的值、数量和均匀性会严重影响表征结果的精度。同时,由于响应信号的时间和空间分布均匀性,可以通过提取部分区域在多个积分周期内的响应信号进行统计,来代替全局统计,这样可以提高计算效率,控制统计样本量。并且,通过提取并分析监控视频图像中部分暗背景中的电离辐射响应信号,能够实现静态场景传感器不遮光条件下的核辐射探测。

参 考 文 献

- [1] Hirvonen L M, Suhling K. Photon counting imaging with an electron-bombarded pixel image sensor[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 617.
- [2] Pérez M, Haro M S, Sidelnik I, *et al.* Commercial CMOS pixel array for beta and gamma radiation particle counting [C]//2015 Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA), July 30-31, 2015, Villa Maria, Argentina. New York: IEEE, 2015: 11-16.
- [3] Wang F, Wang M Y, Tian F S, *et al.* Study on two-dimensional distribution of X-ray image based on improved Elman algorithm [J]. *Radiation Measurements*, 2015, 77: 1-4.
- [4] Wei Q Y, Wang Z P, Dai T T, *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.
- [5] Xu S L, Zou S L, Huang Y J, *et al.* Analysis of photon radiation response characteristics of 4T-PPD-APS[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0504002. 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.
- [6] Cai J D, Liu Q, Zou Y, *et al.* Design of tunable light source for calibration of CMOS image sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0323001. 蔡锦达, 刘倩, 邹亿, 等. CMOS 图像传感器校准用可调光源 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0323001.
- [7] Xia Z Y, Tian Y Z, Liang E J, *et al.* Infrared light field imaging based on camera array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0911002. 夏朝阳, 田勇志, 梁二军, 等. 基于相机阵列的红外光场成像 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0911002.
- [8] Tan Z G, Ou J P, Zhang J, *et al.* A laminar denoising algorithm for depth image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0510002. 谭志国, 欧建平, 张军, 等. 一种层析深度图像去噪算法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0510002.
- [9] Battaglia M, da Viá C, Bortoletto D, *et al.* R&D paths of pixel detectors for vertex tracking and radiation imaging [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 716: 29-45.
- [10] Zentai G, Colbeth R. Pros and cons of CMOS X-ray imagers[C]//2012 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications Proceedings, May 18-19, 2012, Budapest, Hungary. New York: IEEE, 2012: 6226665.
- [11] Servoli L, Baldaccini F, Biasini M, *et al.* Active pixel as dosimetric device for interventional radiology [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2013, 720: 26-30.
- [12] Magalotti D, Placidi P, Paolucci M, *et al.* Experimental characterization of a wireless personal sensor node for the dosimetry during interventional radiology procedures [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 65(5): 1070-1078.
- [13] Magalotti D, Placidi P, Dionigi M, *et al.*

- Experimental characterization of a personal wireless sensor network for the medical X-ray dosimetry[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(9): 2002-2011.
- [14] Fu M. Study on key parameters of CMOS MAPS for charged particle detection [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
付民. CMOS MAPS 带电粒子探测器关键参数研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [15] Pang L Y. Can smartphones measure radiation exposures? [J]. Journal of Student Science and Technology, 2015, 8(1): 26-31.
- [16] Servoli L, Battisti D, Biasini M, *et al.* An active pixel sensor to detect diffused X-ray during interventional radiology procedure [J]. Journal of Instrumentation, 2012, 7(4): P04004.
- [17] Meroli S, Passeri D, Servoli L. Measurement of charge collection efficiency profiles of CMOS active pixel sensors[J]. Journal of Instrumentation, 2012, 7(9): P09011.
- [18] Conti E, Placidi P, Biasini M, *et al.* Use of a CMOS image sensor for an active personal dosimeter in interventional radiology [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62 (5): 1065-1072.
- [19] Kuhn J, Molz A, Gröber S, *et al.* Irradioactivity: possibilities and limitations for using smartphones and tablet PCs as radioactive counters [J]. The Physics Teacher, 2014, 52(6): 351-356.
- [20] Cheng Q Q, Yuan Y Z, Ma C W, *et al.* Gamma measurement based on CMOS sensor and ARM microcontroller[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, 28(9): 122.
- [21] Cogliati J J, Derr K W, Wharton J. Using CMOS sensors in a cellphone for gamma detection and lassification[EB/OL]. (2014-01-04) [2019-01-01]. <https://arxiv.org/abs/1401.0766>.
- [22] Xu S L, Zou S L, Huang Y J. γ -ray detection using commercial off-the-shelf CMOS and CCD image sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(20): 6599-6604.
- [23] Xu S L, Zou S L, Wu Z, *et al.* Research on availability of CIS digital module as monitoring and radiation alarm equipment under condition of nuclear accidents[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38 (1): 88-94.
徐守龙, 邹树梁, 武钊, 等. CIS 数字模组作为核辐射环境监控及报警设备的可用性研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(1): 88-94.