

CMOS APS 摄像机的 γ 射线辐射损伤模式与 损伤表征研究

徐守龙^{1,2*}, 林奎成³, 韩永超^{4**}, 邹树梁^{1***}, 余修武¹, 吴其反², 曲延涛⁴, 全洪涛⁵, 李增彦⁶

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中国工程物理研究院材料研究所, 四川 绵阳 621700;

⁴中国原子能科学研究院辐射安全研究所, 北京 102413;

⁵电子科技大学机械与电气工程学院, 四川 成都 611731;

⁶西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

摘要 为了研究以 CMOS 有源像素传感器为感光元件的摄像机系统的辐射损伤模式及损伤表征, 利用在线辐射实验的方法, 结合辐射干扰噪声抑制算法, 研究了彩色视频图像信息随辐射总剂量的变化情况, 并讨论了不同辐射总剂量照射下硬件的辐射寿命, 以及 γ 射线辐射对数字图像信息的影响。研究表明: 摄像机的 γ 射线辐射损伤模式主要表现为透光率下降, 传感器的暗电流增大、失真和损坏, 以及主板的瞬时损坏; 感光元件的辐射总剂量效应主要导致本底噪声的增大, 且噪声主要集中在图像的暗部; 暗电流导致图像灰条纹中平均像素值的增量远不及因镜头透光率下降而造成平均像素值的减小量; 摄像机自带的曝光补偿功能在检测到视频图像亮度下降后会进行全局补偿处理, 增大视频所有像元的像素值。该研究得到的视频图像信息随辐照总剂量变化规律可以作为一种以 CMOS 有源像素传感器为感光元件的摄像机辐射总剂量标定的一种方法, 帮助判断此类摄像机的辐射损伤失效几率, 提高视频监控系统在放射性环境中应用的可靠性。

关键词 光学器件; 有源像素传感器摄像机; γ 射线; 损伤模式; 损伤表征; 辐射寿命

中图分类号 TN946.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1523002

Study on γ -Ray Irradiation Damage Mode and Characterization of CMOS APS Camera

Xu Shoulong^{1,2*}, Lin Kuicheng³, Han Yongchao^{4**},

Zou Shuliang^{1***}, Yu Xiuwu¹, Wu Qifan², Qu Yantao⁴, Quan Hongtao⁵, Li Zengyan⁶

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*Instituted of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621700, China;*

⁴*CNNC New Energy Company Limited, Beijing 102413, China;*

⁵*School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,*

Chengdu, Sichuan 611731, China;

⁶*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China;*

Abstract In order to study the radiation damage mode and characterization of the camera system with CMOS active pixel sensor as the photosensitive element, this paper uses the method of on-line radiation experiment, combined with the radiation interference noise suppression algorithm, to study the change of color video image information with the total radiation dose, and discusses the radiation life of the hardware under the irradiation of different total

收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-04-15; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(11905102, 61601423)、湖南省教育厅优秀青年项目(18B268)、南华大学引进人才科研启动项目(190XQD065)

* E-mail: xusl@usc.edu.cn; ** E-mail: hanyongchao@ciae.ac.cn; *** E-mail: zousl2013@126.com

radiation doses and the effect of γ -ray radiation on the digital image information. Results show that the mode of γ -ray radiation damage of the camera is mainly reflected in the light transmittance decrease caused by the radiation damage of the lens, the dark current increase, distortion and damage of the sensor, and the instantaneous damage of the main board. The total radiation dose effect of the sensor mainly results in the increase of background noise, and most of the noise signals are concentrated in the dark part of frames. The increment of the average pixel value in the gray stripe of the image caused by the dark current is far less than the decrease of the average pixel value caused by the lens radiation damage. The exposure compensation function of the camera will carry out global compensation processing after detecting the decrease of video image brightness, which increases the pixel values of all pixels. The relationship between the video image information and total ionizing dose can be used as a method to calibrate the failure probability of the CMOS active pixel sensor camera, which can improve the reliability of the application for this kind of video monitoring system in the radiation environment.

Key words optical devices; active pixel sensor camera; γ -ray; damage mode; damage characterization; radiation life

OCIS codes 230.0040; 230.5160; 230.5170; 040.1490; 040.5160

1 引 言

摄像机的辐射损伤是研究摄像机的感光元件和电子学系统辐射效应的一个重要方向,也是将视频监控应用于核辐射环境而备受关注的关键词之一。摄像机在核辐射环境中的应用越来越普遍和智能化。人工智能技术在核辐射环境监控中的应用十分依赖于监控图像的质量。利用感光元件进行核辐射探测的技术主要是利用智能算法对视频图像中辐射响应信息进行处理。然而,辐射损伤会影响视频图像信息、干扰智能技术的使用^[1-3]。因此,无论是在对核设施日常状态的监控,还是在核事故应急响应、核设施退役等行动中,摄像机的核辐射损伤是工程技术和理论研究方面都亟待研究和解决的问题。近年来,诸多学者针对空间和地面核辐射环境的光学器件及感光元件的辐射效应开展了一系列研究,并已初步形成体系^[4]。如今的视频监控系统多数采用互补金属氧化物半导体(CMOS)有源像素传感器(APS)作为感光元件,CMOS APS能够直接输出数字信号,具有功耗低、分辨率高等特点,适合应用于辐射环境的视频监控,但需要研究辐射损伤的问题。国内外学者针对CMOS APS的辐射损伤开展了一系列研究,Goiffon等^[5]发现光电二极管的面积是影响总剂量效应并导致暗电流增加的重要因素;靳浩^[6]研究了CMOS像传感器的损伤机制及规律;梁庆威^[7]分析了商用CMOS图像传感器辐射损伤机理及 γ 射线与电子辐照效应的异同;马绍阳^[8]探讨了辐射剂量率对CMOS像传感器暗电流和光响应度的影响规律;Náfrádi等^[9]证实了暗电流图像受总剂量效应和曝光时间的影响;Bagatin^[10]从机理上系统地阐明了金属氧化物半导体(MOS)器件,特别是CMOS图像传感器的电离辐射效应与损伤

机理;王祖军等^[11]对被不同粒子辐射后的损伤效应与机理进行了深入探讨,并从多个参数分析了商用光电二极管图像传感器的总剂量效应^[12],以及在⁶⁰Co射线不同剂量率辐照后的退化和退火效应^[13]。在辐射损伤及干扰的修复方面,利用信息融合技术^[14]、图像修复技术^[15]、多重中值滤波和第二代曲波变换相结合的混合降噪方法^[16],以及基于卷积神经网络的辐射图像降噪方法能够对辐射噪声进行一定程度的抑制。然而,目前常用的降噪方法会影响辐射损伤效应在视频图像中的表征,因此有必要提出一种有效消除辐射响应噪声的方法,在研究辐射损伤时不会干扰总剂量效应的辐射损伤实验结果。在前期研究工作中,虽然已经对多类CCD和CMOS感光元件的 γ 射线辐射效应^[17]以及辐射损伤^[18]进行了一定程度的研究,但是,摄像机作为一个包含感光元件和电子学器件的集成系统,同时具有数字图像处理算法,单一元器件的辐射效应并不能完全代表整个系统的辐射损伤。因此,有必要从系统硬件的辐射寿命和输出的数字图像两方面同时进行研究。本文在前期对多种像素传感器辐射效应的研究基础上,通过开展CMOS APS摄像机系统中必须暴露于 γ 射线辐射下的光学器件、感光元件以及数据采集与处理电路的辐射损伤模式实验研究,分析了不同辐射总剂量照射下硬件的辐射寿命以及 γ 射线辐射对数字图像信息的影响。利用在线实验的方法,结合辐射干扰噪声抑制算法研究了彩色视频图像信息随辐射总剂量的变化情况。

2 实验准备

2.1 实验样品

实验选用一款SONY IMX 222型CMOS有源像素传感器作为感光元件,该类型有源像素传感器

广泛应用于商用视频监控摄像机。APS 的像元尺寸为 $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$, 含有 2.43×10^6 个有效像素。APS 具有相关双采样电路, 能够抑制固定模式噪声。传感器采用拜耳阵列, 即在 4×4 阵列中, 由 8 个绿色(G)、4 个蓝色(B)和 4 个红色(R)像素组成, 如图 1 所示。

光学镜头采用 3.6 mm 和 4 mm 两种定焦、定光圈镜头; 图像处理系统采用安霸 A5S 芯片; 摄像机供电为 12 V、2 A, 数据传输采用 RJ45 接口网线传输。摄像机前端系统包含传感器电路板和主板, 两块电路板用柔性电路板(FPC)排线连接, 任意主板和传感器电路板均可以搭配使用。传感器电路板和主板分别放置于钨屏蔽体的两个隔间内。屏蔽体外壳为 1 cm 纯度为 99% 的钨板, 中间屏蔽挡板为相同材质 0.5 cm 厚钨板, 用于进一步降低主板受照

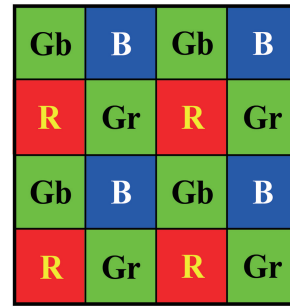


图 1 传感器拜耳阵列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor Bayer array

射量; 传感器电路板前端开直径 17 cm 圆孔, 用于安装定焦镜头。CMOS 有源像素传感器和集成在主板上的重要芯片均集中在 17 cm 直径孔范围内, 因此可以近似认为感光元件和主板上各芯片受 γ 射线辐照是均匀的。实验系统图如图 2 所示。

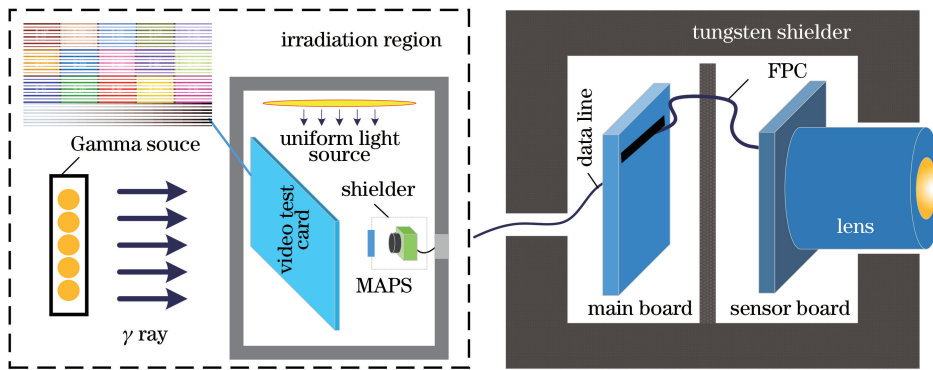


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic of experimental system

2.2 实验条件

辐射实验采用中国原子能科学研究所的 ^{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 130 kCi ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$), 辐射场不均匀度小于 5%, 受照样品辐射剂量率为 $60 \sim 2000 \text{ Gy/h}$ 。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 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验时, 首先测得实验点和屏蔽体内主板和传感器电路板位置的辐射剂量率, 再将加装屏蔽体的摄像机系统正对放射源放置于暗箱内, 暗箱用于隔绝环境光线的干扰。摄像机镜头正对视频测试卡并采集彩色图像信息。进行辐射损伤实验的镜头不放置在屏蔽体内。

2.3 数据采集与处理

实验采用网络硬盘录像机(NVR)和计算机同时采集视频数据, 实验数据均是在辐照期间实时采

集。本文针对 CMOS APS 摄像机系统进行辐射损伤研究, 保留摄像机固有的图像与处理算法, 固定积分时间、增益和白平衡, 关闭降噪功能。视频数据格式为视频监控系统通用的“.246”压缩视频文件, 采样频率为 25 Hz。进行数据处理时, 首先将视频图像进行光学镜头几何畸变修正, 再将视频文件转化为“.JPEG”格式的帧图像, 由于辐射损伤实验数据采集时间较长, 且总剂量效应不会发生瞬时的变化。因此, 帧转化率为 1 s 储存 1 帧图像。

对帧图像数据进行处理时, 首先采用一种辐射噪声抑制算法, 消除帧图像中的辐射噪声, 这种降噪算法适合静态图像降噪, 具体计算方法将在后文中描述。利用 Matlab 软件对每帧图像中红色、绿色和蓝色色彩通道像素值以及平均灰度数据进行处理。对于灰色条纹图像数据, 分别提取 20 个不同灰度背景区域内信息; 对于彩色图像, 提取全局信息。

3 实验结果与讨论

3.1 辐射损伤模式

摄像头系统中必须暴露在辐射环境下的部分包括镜头、传感器电路板和主板。辐射损伤实验中,摄像机的损伤模式以图像质量是否发生明显改变和电路板是否停止工作来进行判断和衡量。利用 WGT-S 型透光率雾度测定仪对辐照前后滤光片和镜头的透光率进行了测量,实验结果如表 1 所示,表中数据分别显示了滤光片、3.6 mm 镜头和 4 mm 镜头受

到不同辐射总剂量照射后透光率变化情况。镜头受 γ 射线辐射照射后,表现为随辐射总剂量的增大,透光率显著下降。但材质为明胶片的滤光片随辐射总剂量增大后透光率下降相比于镜头并不明显。实验数据可以定性的表明,玻璃材质镜头的透光率会随着辐射总剂量的增大而明显下降。当光圈与快门(积分时间)固定时,变色的镜头会影响光学器件的进光量。此时在摄像机系统内存在:辐射总剂量、镜头透光率、进光量、图像亮度、像素值灰度之间的影响关系。

表 1 镜头及滤光片透光率随辐射总剂量变化关系

Table 1 Relationship between the transmittance of lens and filter with total radiation dose

No.	Name	Total ionizing dose / %		
		0 Gy	88.4 Gy	1010 Gy
1 #	Filter	97.7	95.2	92.3
2 #		98.2	95.6	93.3
3 #		85.2	76.0	19.4
4 #	3.6 mm lens	84.8	74.8	19.9
5 #		87.4	78.9	20.7
6 #	4 mm lens	86.5	78.3	18.8

图 3 为 CMOS APS 感光元件辐射损伤前后发生明显变化的帧图像。暗图像实验中,当传感器电路板的辐射总剂量达到 570 Gy 时,发生从图 3(a)到图 3(b)的变化。变化前没有明显的征兆,损伤过程表现为瞬时对全局图像信息的整体影响,即前一帧图像处于正常模式,后一帧为损伤模式。暗图像损伤后的画面表现为灰白色的纵向条纹,并且失去感光能力。当传感器电路板的辐射总剂量达到 242 Gy 时,发生从图 3(c)到图 3(d)的图像失真变化。彩色图像损伤后表现为感光元件无法正常获取观测对象的色彩信息,对各区域内颜色的表达错乱。损伤的帧图像中依然可以清晰地分辨出色彩边界,但从视频测试卡下端灰度条纹辐照前后变化情况可以看出,传感器基本失去对不同灰度背景区域边界的分辨能力,并将多个不同灰度背景信息的区域进

行了合并,且错误地表达了色彩信息。早先研究结果表明,对于 CMOS 半导体器件,辐射效应主要表现为 MOS 结构的总剂量效应^[6]。根据 CMOS 有源像素传感器结构及工作原理,出现损伤变化可能是由于感光元件中包含 MOS 结构的放大器,行选址晶体管或列选址晶体管出现辐射总剂量效应损伤。

图 4 为不同总剂量照射后,CMOS APS 摄像机暗图像直方图。早先研究已证实,总剂量效应会导致 CMOS APS 的暗电流增大。图 4 表示了像素值为 1~100 的像素数量在不同总剂量辐照后的分布情况。可以看出,随着辐射总剂量的增大,具有较高像素值像元的数量增多。由分布图可以看出,暗电流产生的噪声在 46.53 Gy 以内主要分布在像素值 40 以下,但即使辐射总剂量达到 685.2 Gy,暗电流

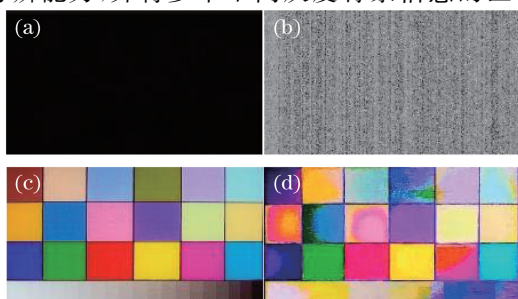


图 3 暗图像与彩色图像辐射损伤

Fig. 3 Radiation damage of dark and color image

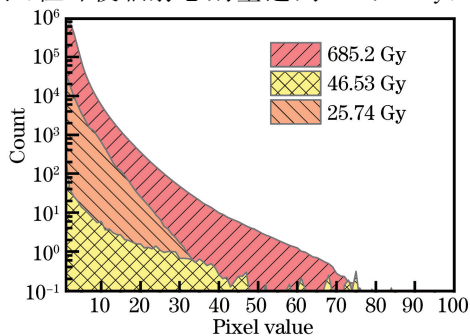


图 4 暗图像暗电流噪声分布图

Fig. 4 Distribution of dark current noise in dark image

产生的噪声主要分布在像素值 75 以下。因此 CMOS APS 的辐射总剂量效应主要是导致本底噪声的增大,且多数噪声信号集中在图像的暗部。根据 CMOS APS 的辐射损伤原理,总剂量产生的暗电流是由于 Si/SiO₂ 界面处产生的陷阱电荷被困陷阱电荷产生的电场扩大的空间电荷区收集,并在像素内产生与响应信号无关的本底噪声。

图 5 为 3 个传感器电路板样品及 21 个主板样品损坏时的辐照总剂量。摄像机传感器的损坏表现为图像信息质量的明显变化或感光能力的丢失;主板的损伤模式表现为突然出现的信号传输中断,且重启后仍无法工作,同时还存在正常工作的主板断电重启后无法工作的情况。由于传感器电路板和主板可以任意匹配,用多个主板可以测得 1 个传感器电路板的辐射寿命。如图 5 所示,主板寿命多数集中在 50 ~150 Gy 之间,较低剂量率辐照时寿命较短,较高剂量率辐照时寿命相对较长,部分主板在超过 500 Gy 辐射剂量后仍能正常工作,但取辐照总剂量为 550 Gy 的其中 1 个样品进行断电重连后发现主板失去工作能力,其余平行样品在总剂量接近 600 Gy 时瞬间损坏。受限于实验条件,数据结果仍较少,但从图 5 中可以看出,传感器电路板的辐射寿命远高于主板。当传感器电路板的辐射总剂量达到 242 Gy 时,如图 3(b)所示,传感器电路板并未完全失去感光能力;但当辐射总剂量达到 570 Gy 时,如图 3(d)所示,传感器失去感光能力。图 5 中辐射寿命实验结果显示了摄像机辐射损坏的随机性和分布规律。这可能是由于传感器电路板集成了 CMOS APS 感光元件及外围电路,主板集成了电源以及用于采集、储存、处理和通信的芯片等,在电子元器件中,电容电感耐辐射性能较强,所有包含晶体管的器件都是辐射敏感元件。然而,单个电子元器件的辐

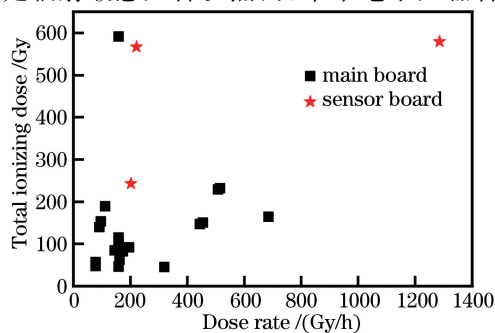


图 5 主板及传感器板辐射寿命散点图
Fig. 5 Scatter diagram of radiation life of main board and sensor board

射寿命也服从统计分布,并不存在一个确定的损伤阈值。因此,系统越复杂,辐射寿命离散性越大,但在某个区域辐射剂量范围内发生损坏的概率较大。

综上所述,摄像机的损伤模式主要表现为镜头的透光率下降、传感器的失真和损坏、主板的瞬时损坏。主板寿命远小于传感器寿命,这可能是由于主板上集成了多种元器件,辐射敏感元件的寿命降低了主板整体寿命,但考虑到主板不需要留感光孔,因此可以进行全封闭屏蔽加固,与传感器之间采用 FPC 排线连接,仅需考虑散热。

3.2 辐射损伤表征

γ 射线对 CMOS APS 摄像机的影响会在一定程度上表现为图像信息的变化,可以用研究持续辐照条件下固定画面灰度信息变化来分析。图 6 为视频测试卡中 20 条灰度条纹辐照前后帧图像实物图。观察图像可以看出,在相同辐射剂量率条件下,随着辐射总剂量的增大,灰度条纹纹理依然清晰,难以肉眼直接观测辐射对视频图像的影响。

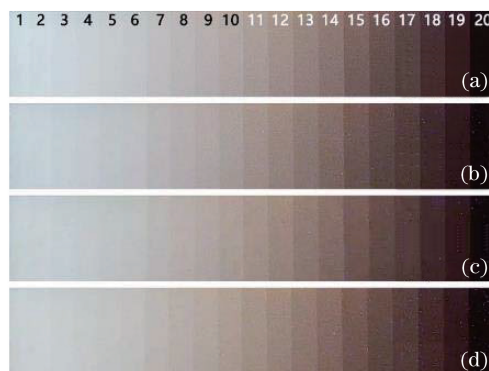


图 6 辐照前后视频测试卡灰度条纹。(a)辐照前;
(b) 50 Gy;(c) 101 Gy;(d) 154 Gy

Fig. 6 Gray scale stripe of video test card before and after irradiation. (a) Before irradiation; (b) 50 Gy; (c) 101 Gy; (d) 154 Gy

为了进一步研究视频图像受 γ 射线辐射总剂量的影响,对辐照期间各灰度区域图像进行处理和统计。如图 6 所示, γ 射线电离辐射在感光元件像元内电离产生的电荷会在图像中随机形成一簇白色亮斑,即辐射噪声。由于辐射噪声是感光元件对 γ 射线的响应而并非损伤,辐射响应噪声在视频帧图像数据中的空间分布和时间分布相同,且相同位置像元连续发生辐射响应的概率较小,数量与辐射剂量率相关^[19]。因此若直接对辐射环境下采集的帧图像灰度数据进行统计,势必会将这些噪声统计在内,可以借助辐射噪声的这一特点对固定画面进行降噪。降噪算法的逻辑框图如图 7 所示。经过降噪算

法处理后帧图像网格图如图 8 所示,可以看出,降噪前,图中各区域均出现噪声,且图像区域内背景像素

值越低,噪声越明显。经过降噪算法处理后,帧图像已无明显噪声。

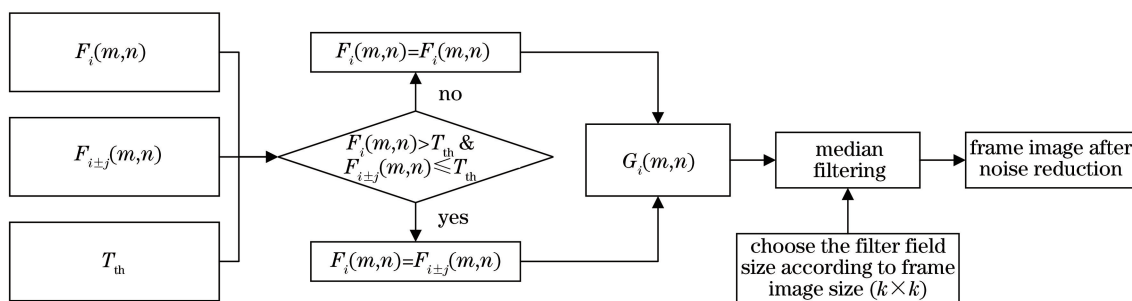


图 7 固定图像降噪算法逻辑框图

Fig. 7 Logic block diagram of fixed image denoising algorithm

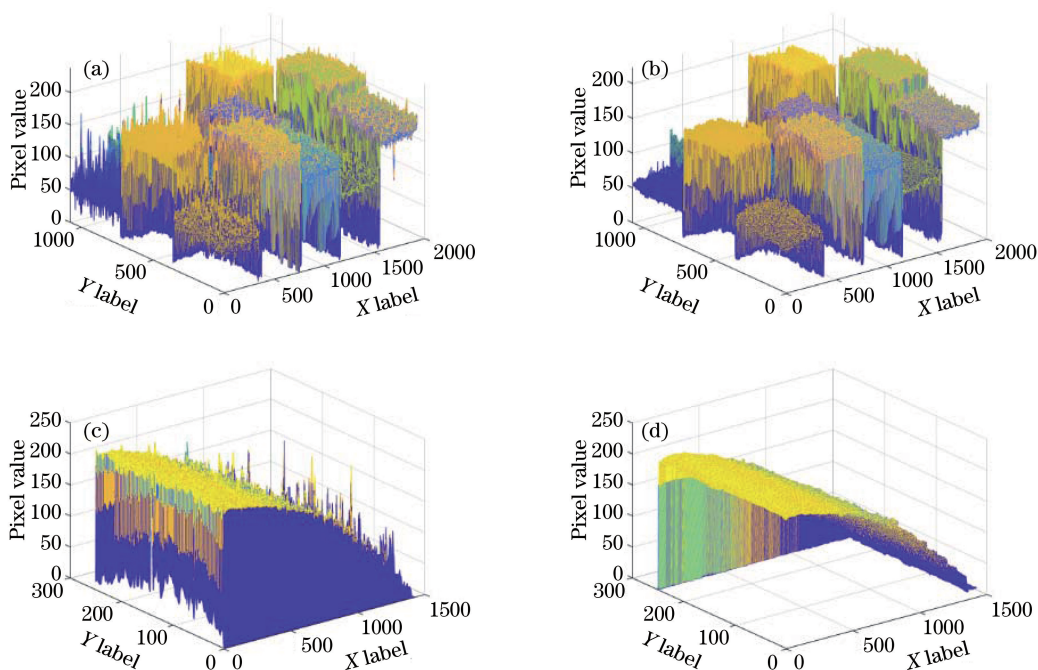


图 8 降噪前后帧图像各通道像素值网格图。(a)降噪前的彩色网格图像;(b)降噪后的彩色网格图像;
(c)降噪前的灰度条纹;(d)降噪后的灰度条纹

Fig. 8 Grid images of pixel values for each channel of the frame image before and after noise reduction. (a) Color grid image before noise reduction; (b) color grid image after noise reduction; (c) gray scale stripe before noise reduction; (d) gray scale stripe after noise reduction

图 9 为辐照期间 CMOS APS 观测的图 6 画面中各灰色条纹 R、G、B 及灰度通道像素值随辐照总剂量的变化散点图。可以看出,20 条灰度背景的 R、G、B 和灰度通道平均像素值均随辐照总剂量的增大而减小。然而,在辐照总剂量达到 54.88、75.88、102.26 和 130.03 Gy 时,灰度条纹中各通道平均像素值均瞬时增大。这可能是由于摄像机自带的曝光补偿功能检测到视频图像亮度下降而做出的处理结果。如图所示,随着辐照总剂量增大,CMOS APS 感光元件各像元暗电流增大,总体表现为本底噪声增大,而视频图像是可见光信号与本底噪声的

叠加。辐照总剂量效应使图像中各像元像素值随辐照总剂量的累积而增大。但结合表 1 中实验结果可知,镜头的透光率随辐照总剂量的增大而减小,图 9 中像素值随辐射总剂量变化趋势也是逐渐减小,说明暗电流导致图像灰条纹中平均像素值的增量远不及因镜头辐射损伤导致透光率下降而造成的平均像素值的减小量。

图 9 中各色彩通道像素值平均灰度随总剂量变化趋势及变化率相似,说明 γ 射线对 CMOS APS 感光元件和镜头的辐射损伤引起的色偏并不明显,不影响对色彩的识别。图 10 为辐照期间 CMOS

APS 观测的图 3 画面中彩色方格区域 R、G、B 及灰度通道像素值随辐照总剂量变化的散点图。如图所示,各通道平均像素值均呈现随辐照总剂量增大而逐渐下降的趋势,且与图 8 中相同,出现像素值瞬间

回升的现象。然而,对比图 9 和图 10 可以看出,各色彩通道平均像素值下降趋势和回升的时刻相同,这说明摄像机本身对因镜头受到辐射损伤导致的透光率下降的补偿是全局补偿。

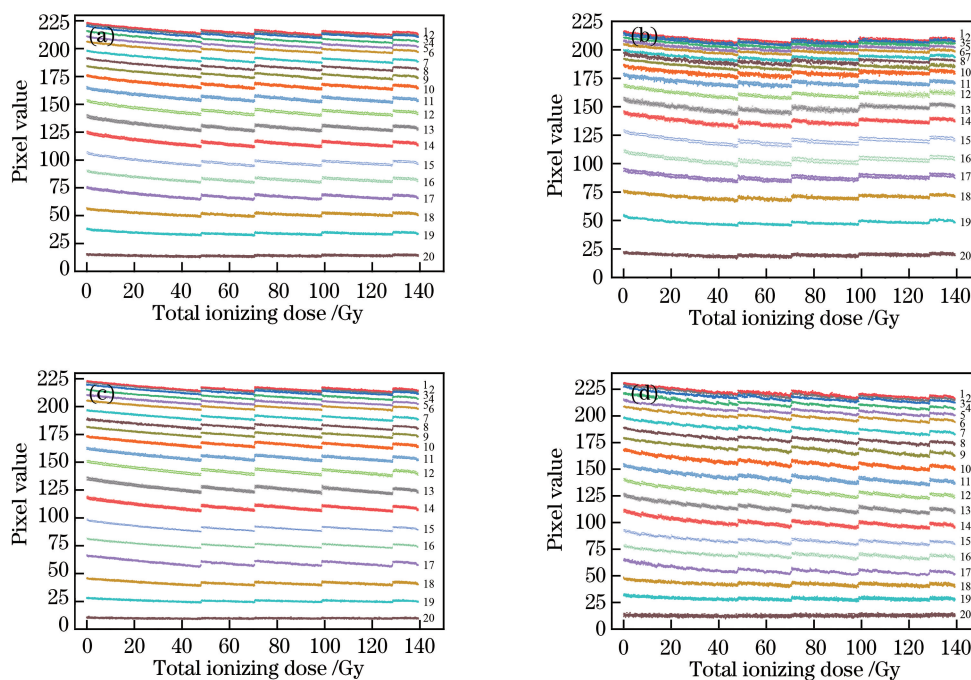


图 9 各灰色条纹的像素值随总剂量变化散点图。(a)灰度值;(b)红色像素;(c)绿色像素;(d)蓝色像素
Fig. 9 Relationship between pixel value and total ionizing dose for gray scale stripe image.

(a) Gray value; (b) red pixel; (c) green pixel; (d) blue pixel

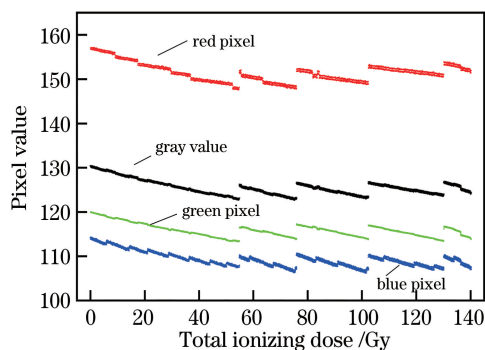


图 10 彩色图像像素值随总剂量变化散点图
Fig. 10 Scatterplot of color image pixel value with total dose

图 11 为对图 9(a)中 4 次因曝光补偿造成的像素值突然增大而进行的修正处理。如图所示,修正后散点组成的曲线并非完全线性,利用指数拟合公式进行拟合,拟合公式如下式所示,各拟合曲线参数如表 2 所示。

$$A_1 \times \exp(-x/t_1) + y_0 \quad (1)$$

可以看出,所有灰条纹平均像素值均随辐照

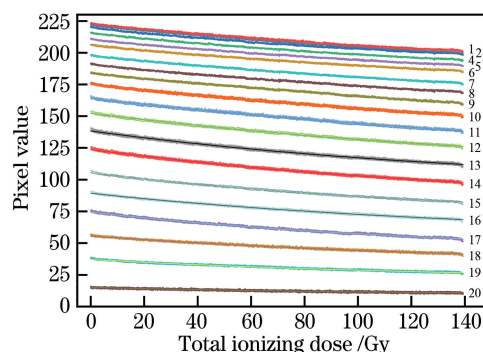


图 11 修正后各灰色灰度通道平均像素值随总剂量变化散点图

Fig. 11 Scatterplot of the average pixel value for each gray channel after correction with the total dose

总剂量的增大而线性下降, y_0 值越大拟合曲线的线性度(R^2)越好。基于这一现象,该研究可以作为 CMOS APS 摄像机辐射总剂量标定的一种方法,即在前文中对摄像机关键组成部分辐照寿命认识的基础上,通过图像信息了解 CMOS APS 摄像机的辐照总剂量,从而帮助判断摄像机的辐射损伤失效几率。

表 2 散点指数拟合结果
Table 2 Scatter index fitting results

No.	y_0	t_1	A_1	R^2
1	178.47	43.13	198.36	0.9982
2	181.64	41.33	189.12	0.9975
3	185.89	33.84	146.91	0.9969
4	179.02	36.53	162.38	0.9982
5	172.80	37.59	180.15	0.9983
6	167.73	38.07	184.31	0.9982
7	152.21	45.34	215.53	0.9982
8	143.61	46.99	226.86	0.9968
9	109.74	73.85	364.45	0.9964
10	120.72	54.28	233.58	0.9925
11	101.28	62.56	266.95	0.9908
12	102.27	49.97	189.24	0.9870
13	93.90	44.53	155.25	0.9887
14	80.70	43.19	151.73	0.9894
15	67.79	37.55	147.12	0.9878
16	54.32	34.97	155.62	0.9856
17	41.65	32.86	135.58	0.9889
18	31.83	23.85	154.06	0.9826
19	20.71	16.44	138.59	0.9809
20	9.04	6.13	117.30	0.8786

4 结 论

本文通过设计辐射实验研究了 CMOS APS 摄像机系统的辐射损伤模式及损伤的表征。损伤主要表现为镜头的透光率下降,传感器暗电流增大、失真和损坏,以及主板的瞬时损坏。主板寿命远小于传感器寿命,这可能是由于主板上集成了多种元器件,辐射敏感元件的寿命降低了主板整体寿命。因此,可以通过屏蔽加固提高主板寿命。CMOS APS 的辐射总剂量效应主要导致本底噪声的增大,且多数噪声信号集中在图像的暗部。

本文提出了一种降噪算法,对于研究总剂量效应对视频图像消除辐射噪声干扰具有较好的效果,该算法能够有效地消除固定图像中的辐射噪声。暗电流导致图像灰条纹中平均像素值的增量远不及因镜头辐射损伤导致透光率下降而造成平均像素值的减小量。摄像机自带的曝光补偿功能在检测到视频图像亮度下降后会进行全局补偿处理,视频图像中所有像元的像素值均增大。对因补偿造成像素值突然增大进行修正后,所有灰条纹平均像素值均随辐照总剂量的增大而线性下降,截距越大线性拟合的线性度越好。因此,这种视频图像信息随辐照总剂量的变化规律可以作为摄像机辐射总剂量标定的一种方法,帮助判断摄像机的辐射损伤失效几率。

参 考 文 献

- [1] Hopkinson G R, Goiffon V, Mohammadzadeh A. Random telegraph signals in proton irradiated CCDs and APS[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4): 2197-2204.
- [2] Goiffon V, Estriebeau M, Magnan P. Overview of ionizing radiation effects in image sensors fabricated in a deep-submicrometer CMOS imaging technology [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(11): 2594-2601.
- [3] Goiffon V, Estriebeau M, Marcelot O, et al. Radiation effects in pinned photodiode CMOS image sensors: pixel performance degradation due to total ionizing dose [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 2878-2887.
- [4] Chen P X. Radiation effects on semiconductor devices and integrated circuits[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 1-3.
陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 1-3.
- [5] Goiffon V, Virmontois C, Magnan P, et al. Identification of radiation induced dark current sources in Pinned PhotoDiode CMOS Image Sensors [J]. 2011 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2011: 321-328.
- [6] Jin H. Research on CMOS image sensor of space radiation effect [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
靳浩. 空间辐射对 CMOS 像感器性能影响的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [7] Liang Q W. γ -ray and electron irradiation effects on a CMOS image sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
梁庆威. CMOS 图像传感器 γ 射线及电子辐照效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [8] Ma S Y. Research on radiation dose rate effect on the performance of CMOS image sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
马绍阳. 辐射剂量率效应对 CMOS 像感器工作性能的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [9] Náfrádi G, Czifrus S, Kocsis G, et al. Analysis of dark current images of a CMOS camera during gamma irradiation [J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(12): 3169-3175.
- [10] Bagatin M. Ionizing radiation effects in electronics [M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [11] Wang Z J, Lin D S, Liu M B, et al. Radiation damage effects on the CMOS active pixel sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 945-950.

- 王祖军, 林东生, 刘敏波, 等. CMOS有源像素图像传感器的辐照损伤效应[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 945-950.
- [12] Wang Z J, Ma W Y, Huang S Y, et al. Characterization of total ionizing dose damage in COTS pinned photodiode CMOS image sensors[J]. AIP Advances, 2016, 6(3): 035205.
- [13] Wang Z J, Ma Y W, Liu J, et al. Degradation and annealing studies on Gamma rays irradiated COTS PPD CISs at different dose rates [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2016, 820: 89-94.
- [14] Wang X Q. On irradiated image denoising technology based on image fusion[D]. Hengyang: University of South China, 2015.
王希勤. 一种基于双图像传感器信息融合的辐照图像降噪技术研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- [15] Yang B, Zhao L H, Deng Q. A novel anti-nuclear radiation image restoration algorithm based on inpainting technology [J]. Journal of University of South China (Science & Technology), 2016, 30(4): 56-61.
杨斌, 赵立宏, 邓骞. 基于图像修复技术的抗核辐射图像恢复方法[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2016, 30(4): 56-61.
- [16] Wang D J, Shi J F, Wu Q, et al. Application of integrative denoising method for radiation image denoising [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(1): 97-100.
王德娇, 史晋芳, 吴倩, 等. 一种混合降噪方法在辐射图像降噪处理中的应用[J]. 机械设计与制造, 2017(1): 97-100.
- [17] Xu S L, Zou S L, Huang Y J, et al. Comparative study on γ -ray radiation response characteristics of CCD and CMOS pixel sensor[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(6): 815-822.
徐守龙, 邹树梁, 黄有骏, 等. CCD与CMOS像素传感器 γ 射线电离辐射响应特性对比研究[J]. 发光学报, 2018, 39(6): 815-822.
- [18] Xu S L, Zou S L, Huang Y J. Effect of γ -ray ionizing radiation on CMOS active pixel sensor [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(3): 308-315.
徐守龙, 邹树梁, 黄有骏. γ 射线电离辐射对商用CMOS APS性能参数的影响[J]. 发光学报, 2017, 38(3): 308-315.
- [19] Xu S L, Zou S L, Han Y C, et al. Ionizing radiation response uniformity of solid-state image sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0728007.
徐守龙, 邹树梁, 韩永超, 等. 固态图像传感器的电离辐射响应均匀性[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0728007.