

CMOS 有源像素传感器辐射损伤对星敏感器星图识别影响机理与识别算法*

冯婕^{1)2)†} 崔益豪¹⁾²⁾³⁾ 李豫东^{1)2)‡} 文林¹⁾²⁾ 郭旗¹⁾²⁾

1) (中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2) (新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2022 年 5 月 6 日收到; 2022 年 5 月 22 日收到修改稿)

为分析恶劣空间辐射环境导致星敏感器性能退化、姿态测量精度降低的原因, 深入研究了⁶⁰Co- γ 射线辐射环境下互补金属氧化物半导体有源像素传感器 (complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor, CMOS APS) 电离总剂量效应对星敏感器星图识别的影响机理. 通过搭建外场观星试验系统, 实际观测天顶和猎户座天区, 经过星图数据采集、星点提取与星图识别等试验流程, 获得⁶⁰Co- γ 射线辐照后 CMOS APS 噪声对星图背景灰度均值、识别星点数量的影响机理, 并提出一种寻找被辐射噪声湮没星点的识别算法. 通过理论推导分别建立了 CMOS APS 暗电流噪声、暗信号非均匀性噪声和光响应非均匀性噪声与星点质心定位误差的定量关系. 研究结果表明⁶⁰Co- γ 射线辐照后星敏感器星图背景灰度均值增大、星点识别数量减少, CMOS APS 辐照后噪声增大导致星点质心定位误差增大, 从而影响星敏感器的姿态定位精度, 该研究结果为高精度星敏感器的设计和抗辐射加固提供一定的理论依据.

关键词: 星敏感器, 辐射损伤机理, 星图识别, 互补金属氧化物半导体有源像素传感器, 识别算法

PACS: 42.88.+h, 61.80.Ed, 07.07.Df, 07.89.+b

DOI: 10.7498/aps.71.20220894

1 引言

星敏感器作为卫星姿轨控系统的重要组成部分, 对发射阶段和在轨飞行时卫星的姿态控制有极为关键的作用^[1]. 星敏感器首先通过拍摄星空星图, 再进行星图预处理、星图识别和姿态计算, 最后输出姿态角数据为卫星等航天飞行器进行自主导航. 星敏感器的核心组成部分是成像系统^[2–5]. 早期星敏感器都是以电荷耦合器件图像传感器作为恒星成像器件, 随着星敏感器低功耗、微小型化的需求日趋增多以及互补金属氧化物半导体 (complemen-

tary metal oxide semiconductor, CMOS) 工艺的进步, 基于 CMOS 图像传感器的星敏感器成为目前市场上的主流产品^[6,7].

恶劣的空间辐射环境会使互补金属氧化物半导体有源像素传感器 (complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor, CMOS APS) 暗电流、暗信号非均匀性 (dark signal non-uniformity, DSNU)、光响应非均匀性 (photon response non-uniformity, PRNU) 等辐射敏感参数退化^[8,9]. CMOS 图像传感器参数退化导致星敏感器采集的星图背景噪声明显增大, 从而影响星敏感器的星点质心定位、星图识别、姿态定位精度等性能. 国内

* 国家自然科学基金 (批准号: 12175307) 和自治区天山青年计划 (批准号: 2019Q85) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fengjie@ms.xjb.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn

外已有研究发现: 空间工作的星敏感器经辐照后采集的星图出现信噪比减小、星点拖尾等性能退化现象, 影响星敏感器的在轨姿态定位精度^[10]. 目前, 卫星上会同时装配星敏感器和陀螺仪, 当空间辐射导致星敏感器星图识别能力下降、姿态定位异常时, 工程单位大多采取关闭星敏感器, 依靠陀螺仪进行姿态定位的解决方法. 这种解决方法可以使卫星继续运行, 但存在一定风险, 因为陀螺仪的姿态定位精度和星敏感器相比要低, 存在卫星姿态控制的不确定性. 另外还可以采取图像处理算法去除辐射诱发噪声对星图识别的影响, 但图像处理算法的建立基于对 CMOS APS 辐射诱发噪声机理的深入分析和 CMOS APS 辐射效应对星敏感器星图识别机理的研究, 仅使用常规降噪算法, 有可能把星点信号也滤除, 或者未滤除的部分噪点被星敏感器误认作是星点. 因此, 迫切需要开展 CMOS APS 辐射效应对星图识别的机理研究.

本文主要讨论了 CMOS APS 电离总剂量效应对星敏感器所拍摄星图背景灰度均值、星敏感器识别星点数量的影响机理. 基于机理分析提出了一种寻找未识别星点的算法, 该算法可成功识别被背景噪声湮没的星点. 此外, 通过理论推导分别建立了 CMOS APS 暗电流噪声、DSNU 噪声和 PRNU 噪声与星敏感器质心定位误差的定量关系.

2 样品与辐照试验

2.1 试验样品

试验选取商用 8T CMOS 图像传感器作为样品,

型号为 CMV4000, 分辨率为 2048×2048 , 像素尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$, 灵敏度为 $4.64 \text{ V}/(\text{lux} \cdot \text{s})$ (每秒接受单位光照强度产生 4.64 V 电压), 动态范围为 60 dB , 功耗为 600 mW . 其主要组成模块有: 内部时序发生器、串行外设接口、温度传感器、像素阵列、模拟前端和低压差分信号传输通道. 其中模拟前端电路由可编程增益放大器、模数转换器、偏置电路等模块构成. 图 1 是 8T CMOS 图像传感器的像素单元结构示意图, 在 4T 基本像素单元的基础上, 8T 像素单元增加了采样管 S1 和 S2, 像素内源极跟随器 SF2 等晶体管, 通过将电压信号存储在电容 C1 和 C2 中, 实现全局曝光. 同时, 两个采样电容还将分别储存光生载流子转化后的电压和复位电压, 实现相关双采样, 有效抑制读出噪声^[11].

2.2 ^{60}Co - γ 射线辐照试验

^{60}Co - γ 射线辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所进行. CMOS 图像传感器辐照时剂量率选取 $50 \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$, 总剂量为 $50 \text{ krad}(\text{Si})$, 不加偏置. 当累积剂量到 $7.5, 10, 20, 50 \text{ krad}(\text{Si})$ 时, 降源测试 CMOS 图像传感器辐射敏感参数 (暗电流, DSNU, PRNU). 星敏感器外场观星试验是在丽江天文台进行. 将辐照到 $7.5, 10, 20, 50 \text{ krad}(\text{Si})$ 的 CMOS 图像传感器分别装入星敏感器测试系统, 逐个拍摄猎户座天区和天顶, 每个剂量点各采集 $95.6, 143.4, 525.6 \text{ ms}$ 三个积分时间下的 50 帧图. 将采集的星图输入星图匹配软件, 同时输入标定后的星敏感器的焦距值和主点位置, 对猎户座天区星点进行提取、匹配.

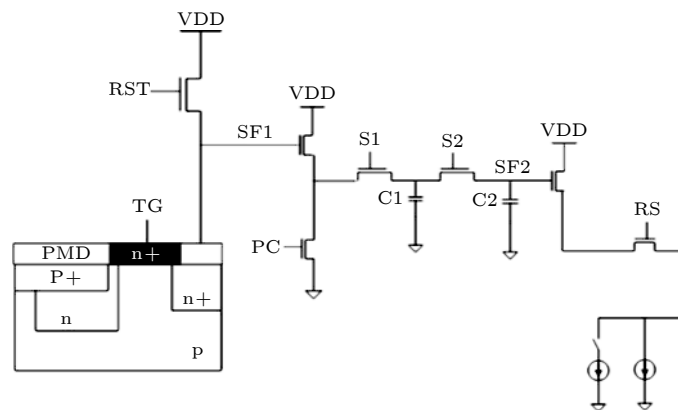


图 1 8T CMOS 图像传感器像素单元结构示意图 (PMD, 金属前介质; TG, 传输栅; RS, 行选择器; RST, 复位晶体管; VDD, 器件内部工作电压; PC, 预充电晶体管)

Fig. 1. Structure diagram of 8T CMOS image sensor pixel unit (PMD, pre-metal dielectric; TG, transfer gate; RS, row select transistor; RST, reset transistor; VDD, device internal operating voltage; PC, pre-charge transistor).

3 CMOS 图像传感器辐射损伤与星敏感器性能退化机理

3.1 CMOS 图像传感器辐射损伤机理

γ 射线辐照 CMOS 图像传感器后, 暗电流随电离总剂量的增加而增大, 如图 2 所示. 暗电流增大的原因一方面是电离辐射在 Si-SiO₂ 界面处产生了大量界面态, 界面态密度随累积剂量的增加而变大^[12]. 界面态充当复合中心增大暗电流的产生率. 另一方面是电离辐射在浅槽隔离以及掩埋型光电二极管 (pinned photodiode, PPD) 上表面的金属前介质 (premetal dielectric, PMD) 层引入了正氧化物陷阱电荷, 它虽然不能作为复合中心直接产生暗电流, 但其附加电场可以使表面耗尽区与 PPD 的耗尽区相互接触, 这样界面态产生的电子-空穴对可漂移进入 PPD 的耗尽区, 从而提高载流子的收集效率^[12].

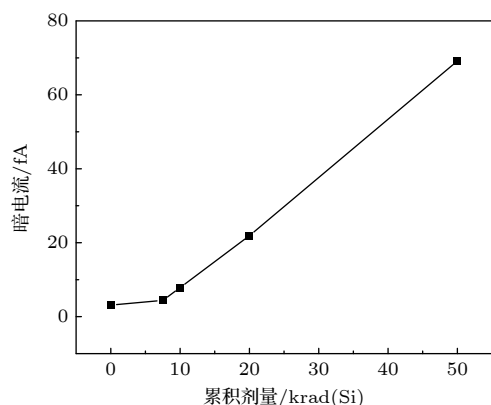


图 2 暗电流随电离总剂量的变化

Fig. 2. Change of dark current versus the total ionizing dose.

DSNU 表征图像传感器芯片每个像素单元在暗场条件下响应的非均匀性. 如图 3 所示, DSNU 随电离总剂量的增加而增大, 电离效应会产生电子-空穴对, 电子和空穴在迁移的同时会随机复合, 而每个像素单元的随机复合概率不同, 从而导致 DSNU 增加; 同时辐射效应产生的缺陷能级, 充当载流子产生-复合中心, 也会增加电子空穴的产生-复合概率, 从而加剧 DSNU 的退化行为.

PRNU 表征光响应相对于平均值的偏差, 以百分数的形式表现. 如图 4 所示, PRNU 随电离总剂量的增加而增大, 电离效应诱发的界面态降低光生载流子寿命, 使得光生电荷收集效率下降, 表现

为量子效率的退化. 由于界面陷阱电荷分布不均匀, 像素之间量子效率退化存在差异, 像素的响应度差异增大, 最终导致 PRNU 上升.

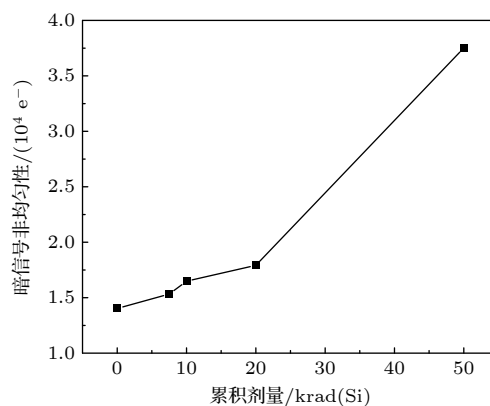


图 3 DSNU 随电离总剂量的变化

Fig. 3. Change of DSNU versus the total ionizing dose.

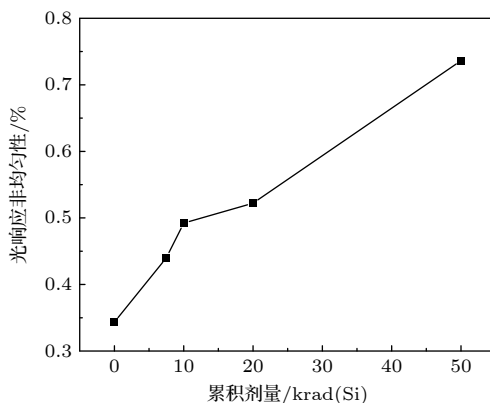


图 4 PRNU 随电离总剂量的变化

Fig. 4. Change of PRNU versus the total ionizing dose.

3.2 星敏感器性能退化机理

3.2.1 背景灰度均值

将辐照到 7.5, 10, 20, 50 krad(Si) 的 CMOS 图像传感器分别装入星敏感器测试系统, 逐个拍摄猎户座天区和天顶, 每个剂量点各采集 95.6, 143.4, 525.6 ms 三个积分时间下的 50 帧图. 分别计算星敏感器每个剂量点不同积分时间所采集星图的背景灰度均值, 如表 1 所列, 随着累积剂量的增加, 背景灰度均值逐渐增大. 对于同一累积剂量, 随着积分时间的增大, 背景灰度均值也逐渐增大. 背景灰度均值增大的主要原因是辐照后 CMOS 图像传感器总噪声的增大.

CMOS 图像传感器噪声来源于其光敏单元的光电二极管、像元晶体管的复位和读出过程、有源

放大器、行列选择开关等^[13], 主要包括暗电流噪声、DSNU 噪声、PRNU 噪声、固定模式噪声和读出噪声. 其中 DSNU 噪声、PRNU 噪声、固定模式噪声随累积剂量的增大而增大. 暗电流噪声既随累积剂量的增大而增大, 也随积分时间的增大而增大.

表 1 星敏传感器每个剂量点不同积分时间所采集星图的背景灰度均值

Table 1. Image gray-mean of the whole star map with different integration time and different dose levels.

| 累积剂量/krad(Si) | 积分时间/ms | 背景灰度均值/e |
|---------------|---------|----------|
| 7.5 | 95.6 | 5381.3 |
| | 143.4 | 5381.7 |
| | 525.6 | 5413.7 |
| 10.0 | 95.6 | 6850.6 |
| | 143.4 | 6842.1 |
| | 525.6 | 6911.3 |
| 20.0 | 95.6 | 15337.5 |
| | 143.4 | 15385.2 |
| | 525.6 | 15394.1 |
| 50.0 | 95.6 | 26813.5 |
| | 143.4 | 26828.3 |
| | 525.6 | 26836.6 |

暗电流噪声等于暗电流产生电子数的平方根. CMOS 图像传感器暗电流来源可大致分为两部分: 像素单元与外围电路. CMOS 图像传感器的工作原理决定了外围电路暗电流是与积分时间无关的固定值; 而像素单元暗电流随着积分时间的增加, 输出灰度值会逐渐增大. 电离辐射引起像素之间暗电流产生率差异性增大, 导致 DSNU 噪声的增加. PRNU 噪声表征了光响应相对于平均值的偏差. 由于界面陷阱电荷分布不均匀, 像素之间量子效率退化存在差异, 像素的响应度差异增大, 最终导致 PRNU 噪声上升.

固定模式噪声体现了像素与像素之间的差异, 在固定积分时间下, 固定模式噪声基本是一个常数, 其主要来源于两个方面: 一方面是制造过程中像素内晶体管或列级晶体管失配; 另一方面是像素内暗电流. 由于晶体管失配导致的固定模式噪声可以通过相关双采样消除, 而暗电流的来源多种多样, 产生机制各不相同, 由暗电流导致固定图像噪声则无法完全消除. 在无光照条件下, 固定模式噪声可用 DSNU 来表征; 在光照条件下, 通过 PRNU 来评估. 读出噪声属于暂态噪声, 是由于电路通道

中各种噪声源 (列放大器、可编程增益放大器和模数转换器) 引起的信号电平的随机波动, 试验中电路通道保持不变, 因此读出噪声的影响可以忽略不计.

3.2.2 识别星点数量

本试验使用三角形算法进行星图识别. 星图识别前需要根据星敏传感器的极限星等对史密松天体物理天文台星表星表 (Smithsonian astrophysical observatory star catalog, SAO) 进行筛选并建立星对角距查找表. 星对角距查找表由星对星号和星对角距余弦值组成. 星对角距余弦值可以根据构成星对的两颗导航星 A 和 B 的方向矢量计算得到. 从 SAO 星表中查到星 A 和星 B 的赤经、赤纬分别为 (α_A, δ_A) 和 (α_B, δ_B) , 则两颗星的方向矢量分别为

$$\mathbf{V}_A = \begin{bmatrix} \cos\delta_A \cos\alpha_A \\ \cos\delta_A \sin\alpha_A \\ \sin\delta_A \end{bmatrix}, \mathbf{V}_B = \begin{bmatrix} \cos\delta_B \cos\alpha_B \\ \cos\delta_B \sin\alpha_B \\ \sin\delta_B \end{bmatrix}. \quad (1)$$

这两颗星星对角距余弦值为 $\mathbf{V}_A \cdot \mathbf{V}_B$, 计算符合星敏感视场角的任意两个颗星的星对角距余弦值并由小到大排序. 然后对星图进行预处理和星点细分定位. 星图预处理先对所拍星图进行滤波, 再通过相应计算得到星点粗定位所使用的阈值, 通过阈值分割, 对星点进行连通域标记. 星点细分定位可以得到星点在星图中的准确位置, 如采用质心法, 可以使精度达到亚像素级别. 三角形星图识别方法分为以下 10 个步骤.

1) 首先从星图中提取星点, 然后按照能量对星点排序, 选择最亮的 S_n 颗星.

2) 在最亮的星中将距离光轴最近的星作为第一目标星 S_1 .

3) 在 S_1 的半径环外, 选取视场中最亮的两颗星 S_2 和 S_3 .

4) 将这三颗星按照三角形几何关系排序.

5) 通过质心法计算这三颗星在星敏传感器探测器面阵上的位置 (X_I, Y_I) :

$$X_I = \frac{\sum_{i,j} i I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}}, \quad (2)$$

$$Y_I = \frac{\sum_{i,j} j I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}}, \quad (3)$$

其中 I_{ij} 是星点在 (i, j) 处的灰度值.

6) 设其中两颗恒星的坐标为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 根据标定出的主点位置 (x_0, y_0) , 焦距 f , 计算得到这两颗恒星在星敏感器坐标系下的方向矢量:

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} -(x_1 - x_0) \\ -(y_1 - y_0) \\ f \end{bmatrix} / r_1, \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} -(x_2 - x_0) \\ -(y_2 - y_0) \\ f \end{bmatrix} / r_2, \quad (5)$$

其中 $r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2}$. 则这两颗星星对角距余弦值的测量值为

$$\alpha_i = \mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2. \quad (6)$$

7) 依照上述方法计算 S_1S_2 , S_1S_3 和 S_2S_3 星对之间星对角距余弦值的测量值 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

8) 考虑到星敏感器的成像误差, 第 7) 步计算出的星对角距余弦值的测量值与星对查找表中星对角距余弦值存在较小的差值, 因此在 $[\alpha_1 - \varepsilon, \alpha_1 + \varepsilon]$, $[\alpha_2 - \varepsilon, \alpha_2 + \varepsilon]$, $[\alpha_3 - \varepsilon, \alpha_3 + \varepsilon]$ 范围内, 对照星对角距查找表, 找出 S_1S_2 , S_1S_3 和 S_2S_3 可能的导航星组合: $[I(k_{12}), J(k_{12})]$, $[I(k_{13}), J(k_{13})]$ 和 $[I(k_{23}), J(k_{23})]$.

9) 从 $[I(k_{12}), J(k_{12})]$, $[I(k_{13}), J(k_{13})]$ 中找出相同的星 S_1 , 从 $[I(k_{12}), J(k_{12})]$, $[I(k_{23}), J(k_{23})]$ 中找出相同的星 S_2 , 从 $[I(k_{13}), J(k_{13})]$, $[I(k_{23}), J(k_{23})]$ 中找出相同的星 S_3 .

10) 若 S_1, S_2, S_3 是唯一的, 就识别成功; 若 S_1, S_2, S_3 不唯一, 则重复以上步骤, 重新构建三角形进行识别.

不同累积剂量下星图三角形识别匹配结果如表 2 所列. 随着累积剂量的增加, 星敏感器识别星点的数量逐渐减少, 当累积剂量增加到 50 krad(Si) 时, 仅能匹配成功 5 颗恒星. 图 5 为星敏感器在不同累积剂量下采集的星图, 星图已经过降噪处理. 可以看出, 在累积剂量为 10 krad(Si) 时, 星敏感器采集的星图可以成功识别 9 颗恒星, 且分布在视场不同区域; 当累积剂量增加到 50 krad(Si) 时, 星敏感器采集的星图仅可以识别 5 颗恒星, 且星点分布较为集中.

针对高累积剂量下星点识别数目下降问题, 对星图识别程序进行调试分析, 发现随着累积剂量的增加进入识别过程的待识别星数目减少. 为了对未

识别的星进行重新识别, 本文首先根据星敏感器的成像原理以及天球坐标系到星敏感器坐标之间的旋转变换、星敏感器坐标系到图像坐标系之间的投影变换关系确定某星点未识别的原因.

表 2 不同累积剂量下星敏感器识别星点数目
Table 2. Number of star points identified by star sensors at different cumulative doses.

| 累积剂量/krad(Si) | 识别星点数目 |
|---------------|--------|
| 0 | 11 |
| 7.5 | 10 |
| 10.0 | 9 |
| 20.0 | 7 |
| 50.0 | 5 |

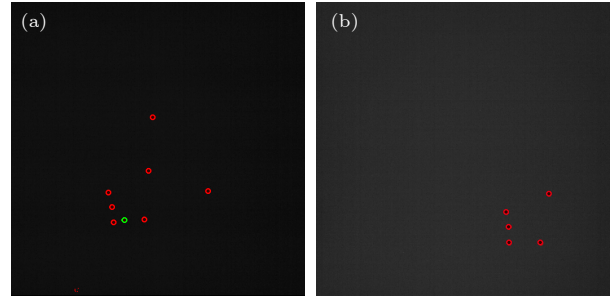


图 5 不同累积剂量下星敏感器采集的星图 (a) 10 krad(Si); (b) 50 krad(Si)

Fig. 5. Star maps collected by the star sensor at different cumulative doses: (a) 10 krad(Si); (b) 50 krad(Si).

以 10 krad(Si) 星图识别到的星 SAO132176 为例 (图 5(a) 中绿色圆圈), 在 50 krad(Si) 星图中该星未能识别. 利用 50 krad(Si) 星图成功识别出的星的观测矢量和在天球坐标系下的方向矢量, 结合姿态四元数估计算法计算出当前星敏感器姿态的四元数:

$$4i + 0.286964j - 0.291097k + 0.653764. \quad (7)$$

并将四元数转换为旋转矩阵 \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.665829 & -0.0151424 & -0.745951 \\ 0.746091 & 0.0195116 & 0.665558 \\ 0.00447652 & -0.999695 & 0.024289 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

在 SAO 星表中查找 SAO132176 在天球坐标系下的赤经和赤纬:

$$(\alpha, \beta) = (82.43333, -1.09214), \quad (9)$$

建立该星在天球坐标系下的单位矢量:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta \\ \sin\alpha\cos\beta \\ \sin\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.131655 \\ 0.991112 \\ -0.01906 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

通过旋转变换, 得到该星在星敏感器坐标系中方向矢量:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.086866 \\ 0.10489 \\ -0.990682 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

根据星敏感器的主点坐标 (x_0, y_0) 和焦距 (f) , 经过投影透视变换, 得到星 SAO132176 在所拍星图的位置:

$$x_i = -f \frac{X}{Z} + x_0 = 1425.99, \quad (12)$$

$$y_i = -f \frac{Y}{Z} + y_0 = 1668.57. \quad (13)$$

考虑到像素坐标都是整数及光学系统畸变等其他因素的影响, 对计算结果进行取整处理, 同时在计算出的位置附近搜索灰度值最大的像素即为星 SAO132176 在此星图中的中心位置.

$$(x_i, y_i) = (1426, 1668), \quad (14)$$

以该坐标为中心, 3×3 窗口为大小, 选为该星覆盖区域, 如图 6(a) 所示.

经过预处理后的星 SAO132176 覆盖区域最大灰度值为 289, 如图 6(b) 所示, 而该星图在阈值分割时所使用的阈值为 296, 导致星 SAO132176 未进入后续质心定位和星图识别过程. 在调整阈值分割值为 285 时, 星 SAO132176 可成功进入后续质心定位和星图识别过程, 并最终被成功识别. 同理, 在设置合适阈值后其余未识别星均可成功识别. 这说明 CMOS 图像传感器辐射损伤导致所拍星图背景灰度均值和方差增大, 而星图阈值分割值通常设置为星图背景灰度均值与三倍星图灰度值方差的和, 当辐照到一定累积剂量后, 某些星斑的灰度值低于阈值分割所设置的值, 从而影响识别结果. 本文提出的寻找未识别星点算法的原理: 当星图识别星数明显低于星敏感器设计准则要求的视场内星点数目时, 则根据 SAO 星表数据和已解算出的姿态信息计算出该幅星图中未识别星点的位置, 并综合考虑未识别星点灰度值范围, 在后续星敏感器所拍星图中程序自动降低阈值以控制进入后续识别流程的待识别星点数目. 使用该算法对后续所拍星图进行验证分析, 证明该算法可有效解决 γ 辐射导致的星敏感器星点识别数目下降的问题.

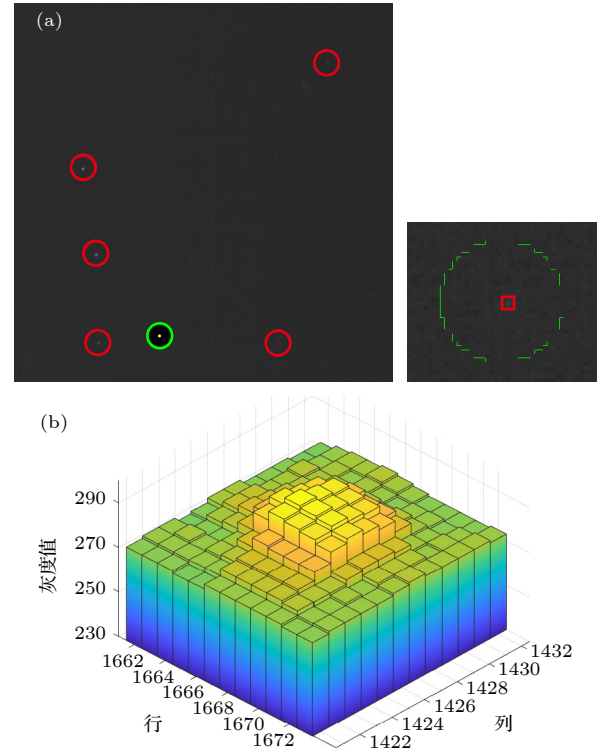


图 6 (a) 星 (SAO132176) 在累积剂量 50 krad(Si) 星图中位置 (白色方框为未识别星覆盖范围); (b) 该星斑及附近灰度值分布

Fig. 6. (a) Star (SAO132176) position of 50 krad (Si) star map (The white box is the coverage of unidentified stars); (b) gray value distribution of the star spot and its vicinity.

3.2.3 星点质心定位精度

星敏感器姿态测量精度主要取决于星点质心定位精度. 星敏感器所拍星图中的星点质心定位误差不能直接计算, 但可通过星对角距标准误差间接计算得到星点质心定位误差, 星对角距标准误差是星点质心定位标准误差的 1.42 倍^[14]. 由于不同累积剂量下星点识别数量有差异, 因此在计算星对角距标准误差时, 其他累积剂量点都选取和 50 krad(Si) 成功识别的相同 5 颗星. 利用实测和理论星对角距计算出不同累积剂量下 5 颗星的星对角距标准误差, 如图 7 所示. 根据星对角距标准误差与质心定位标准误差的关系, 结合星敏感器视场角和分辨率计算得到不同累积剂量下的星点质心定位标准误差 (pixel), 结果如图 8 所示. 从图 7 和图 8 可以看出随着累积剂量的增大, 星对角距标准误差逐渐增大, 质心定位标准误差也逐渐增大, 即星点质心定位精度逐渐下降. 对于同一累积剂量, 随着积分时间的减小, 星对角距标准误差和质心定位标准误差都逐渐增大, 星点质心定位精度逐渐降低. 根据

3.1 节分析, γ 射线辐照会导致 CMOS 图像传感器中的暗电流噪声、DSNU 噪声和 PRNU 噪声增大, 图像传感器辐照后噪声增大又会导致星图背景噪声增大, 从而影响星点质心定位精度. 为了定量分析 CMOS 图像传感器暗电流噪声、DSNU 噪声和 PRNU 噪声对星敏感器质心定位精度的影响, 分别建立各噪声对质心定位误差影响的函数关系式.

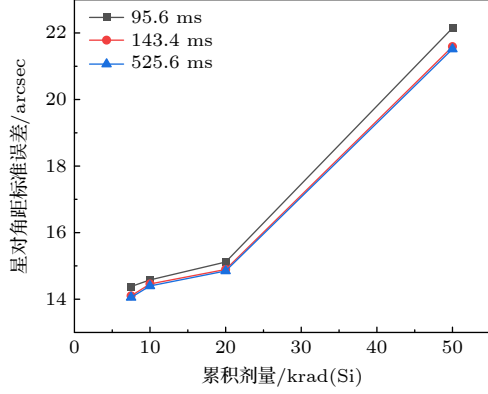


图 7 星对角距标准误差随累积剂量的变化

Fig. 7. Star diagonal distance standard accuracy versus the total ionizing dose.

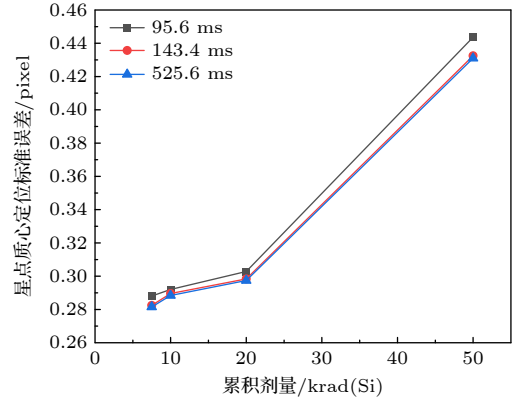


图 8 星点质心定位标准误差随累积剂量的变化

Fig. 8. Star point centroid positioning standard accuracy versus the total ionizing dose.

星图 (i, j) 处的灰度值 I_{ij} 由两部分组成: 星点信号值 R_{ij} 和噪声信号值 N_{ij} , 即

$$I_{ij} = R_{ij} + N_{ij}. \quad (15)$$

以 X 方向 (横坐标) 为例, 由质心提取公式得到噪声导致的 X 方向上的误差 Δx :

$$\begin{aligned} \Delta x &= X_I - X_R \\ &= \frac{\sum_{i,j} i I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}} - \frac{\sum_{i,j} i R_{ij}}{\sum_{i,j} R_{ij}} = \frac{\sum_{i,j} i (R_{ij} + N_{ij})}{\sum_{i,j} (R_{ij} + N_{ij})} - \frac{\sum_{i,j} i R_{ij}}{\sum_{i,j} R_{ij}} = \frac{\left(\sum_{i,j} i N_{ij} \right) \left(\sum_{i,j} R_{ij} \right) - \left(\sum_{i,j} i R_{ij} \right) \left(\sum_{i,j} N_{ij} \right)}{\left[\sum_{i,j} (R_{ij} + N_{ij}) \right] \cdot \left(\sum_{i,j} R_{ij} \right)} \\ &= \frac{1}{\sum_{i,j} (R_{ij} + N_{ij})} \left\{ \sum_{i,j} i N_{ij} - \left(\frac{\sum_{i,j} i R_{ij}}{\sum_{i,j} R_{ij}} \right) \left(\sum_{i,j} N_{ij} \right) \right\} = \frac{\sum_{i,j} (i - X_R) N_{ij}}{\sum_{i,j} (R_{ij} + N_{ij})}, \end{aligned} \quad (16)$$

式中 X_I , X_R 分别为总信号的质心位置和星点信号的质心位置.

由于 CMOS 图像传感器暗电流噪声、DSNU 噪声和 PRNU 噪声均为白噪声^[15], 均值为 0, 因此此类噪声引起的星点中心误差的均值也为 0. 由此可得质心定位误差的方差为

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= E(\Delta x^2) - E(\Delta x)^2 = E(\Delta x^2) \\ &= E \left(\left[\frac{\sum_{i,j} (i - X_R) N_{ij}}{\sum_{i,j} (R_{ij} + N_{ij})} \right]^2 \right). \end{aligned} \quad (17)$$

考虑到真实信号的灰度值远大于噪声信号的灰度值, 且像元之间的噪声互不相关, 即

$$\sum_{i,j} R_{ij} \gg \sum_{i,j} N_{ij}, \quad E(N_{i,j} N_{i',j'}) = 0. \quad (18)$$

则 (17) 式可进一步简化为

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma_N^2 \sum_{i,j} [i^2 + E(x_R^2)]}{\left(\sum_{i,j} R_{ij} \right)^2}, \quad (19)$$

式中 σ_N^2 为噪声方差, $E(x_R^2)$ 为星点真实位置, 其在 $[-0.5, 0.5]$ 像素范围内服从均匀分布, 那么 (19) 式中 $E(x_R^2)$ 可通过以下公式计算得出:

$$E(x_R^2) = \int_{-0.5}^{0.5} \frac{1}{0.5 - (-0.5)} i^2 di = \frac{1}{12}. \quad (20)$$

设质心定位时所选窗口大小为 $m \times m$, 则 (19) 式可进一步计算得到

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{\sigma_N^2 \left[\sum_{i=-(m-1)/2}^{i=(m-1)/2} \sum_{j=-(m-1)/2}^{j=(m-1)/2} \left(i^2 + \frac{1}{12} \right) \right]}{\left(\sum_{i,j} R_{ij} \right)^2} \\ &= \frac{m^4}{12} \cdot \frac{\sigma_N^2}{\left(\sum_{i,j} R_{ij} \right)^2}. \end{aligned} \quad (21)$$

在本次试验中, 窗口大小为 3×3 , 即 $m = 3$, 代入 (21) 式, 得到噪声对质心定位标准误差影响的函数:

$$\sigma_x = 2.598 \cdot \frac{\sigma_N}{R_0}. \quad (22)$$

其中 $R_0 = \sum_{i,j} R_{ij}$, 即所选窗口内总星信号值.

暗电流非均匀性噪声: 在积分时间 t_{int} 内生成的像素平均暗电流电子数为 $I_d t_{\text{int}}$ (I_d 为暗电流值), 暗电流非均匀性噪声方差为 $\sigma_{\text{DCNU}}^2 = I_d t_{\text{int}}$, 那么可得到

$$\sigma_{x,\text{DCNU}} = 2.598 \frac{\sqrt{I_d t_{\text{int}}}}{R_0}. \quad (23)$$

(23) 式中 I_d 随累积剂量的增加而增大, 故暗电流噪声导致的质心定位误差 $\sigma_{x,\text{DCNU}}$ 随累积剂量增加而增大. 由于 R_0 与积分时间呈线性关系, 则 CMOS 图像传感器暗电流噪声导致的质心定位误差与积分时间呈 $1/\sqrt{t_{\text{int}}}$ 关系, 增加曝光时间可以减小暗电流噪声对质心定位误差标准差的影响. 而在本次实验中, 积分时间为 143.4 ms 时, 相较于积分时间为 95.6 ms 时所拍星图, 质心定位误差降低, 但此时星点区域像元已接近饱和区, 光子转移曲线变化速率变缓, 故当积分时间为 525.6 ms 时, 质心定位误差与积分时间 143.4 ms 相比变化不明显.

DSNU 噪声: σ_{DSNU}^2 代表暗信号不均匀性方差, 那么噪声方差为 $\sigma_{\text{DSNU}}^2 t_{\text{int}}^2$. 则 DSNU 噪声带来的质心定位误差为

$$\sigma_{x,\text{DSNU}} = 2.598 \frac{\sigma_{\text{DSNU}} t_{\text{int}}}{R_0}. \quad (24)$$

(24) 式中 R_0 与积分时间呈线性关系, 那么 $\sigma_{x,\text{DSNU}}$ 的大小取决于 σ_{DSNU} , σ_{DSNU} 的值随累积剂量的增

加而增大, 故暗电流不均匀性噪声导致的质心定位误差随剂量增加而增大.

PRNU 噪声: PRNU 噪声等于光响应不均匀度与星信号的乘积, 则可得

$$\sigma_{x,\text{PRNU}} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{PRNU}}^2}{R_0^2} \cdot \sum_{i,j} (x_{i,j} - X_R)^2 R_{ij}^2}. \quad (25)$$

(25) 式与高斯弥散半径和窗口大小有关. 根据实际情况, 高斯弥散半径取 0.8, 计算得到

$$\sigma_{x,\text{PRNU}} = 0.21 \sigma_{\text{PRNU}}, \quad (26)$$

式中 σ_{PRNU} 随累积剂量增加而增大, 故 PRNU 噪声导致的质心定位误差随累积剂量增加而增大.

从以上分析可知, 随着累积剂量的增加, CMOS 图像传感器暗电流噪声、DSNU 噪声以及 PRNU 噪声逐渐增大, 导致星点质心定位误差逐渐增大, 最终影响星敏感器的姿态测量精度, 而适当增加积分时间可减少星点质心定位误差. 但积分时间太大使星点区域像元已接近或到达饱和区, 光子转移曲线变化速率变缓或不再变化, 此时再增加积分时间对星点质心定位误差的减少已不明显.

4 结 论

$^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照后, CMOS APS 暗电流噪声、DSNU 噪声、PRNU 噪声随累积剂量的增大而增大, CMOS APS 总噪声的增大又会导致星敏感器拍摄星图背景灰度均值增大, 背景起伏明显, 从而导致星点识别难度增大, 星点识别数量减少. 基于机理分析, 本文提出了一种寻找未识别星点的算法, 该算法可以成功识别被背景噪声湮没的星点. 研究发现, CMOS APS 暗电流噪声、DSNU 噪声和 PRNU 噪声增大导致星点质心位置的偏移, 最终影响星敏感器星点质心定位精度. 本文对星敏感器设计单位提高星敏感器识别星图成功率、保障卫星在轨安全可靠运行奠定了理论基础.

参考文献

- [1] Yu Z X, Wang Y F, Han F, Liang Y, He L 2013 *Aerospace Shanghai* **30** 65 (in Chinese) [于朝霞, 王有峰, 韩飞, 梁彦, 贺亮 2013 上海航天 **30** 65]
- [2] Zheng X, Huang Y, Mao X, He F, Ye Z 2020 *JPCS* **1510** 012027
- [3] Hancock B R, Stirbl R C, Cunningham T J, Pain B, Wrigley C J, Ringold P G 2001 *Functional Integration of Opto-electro-mechanical Devices & Systems* **4284** 43

- [4] Eisenman A R, Liebe C C 1998 *IEEE Aerospace Conference Proceedings* Snowmass, CO, USA, March 28, 1998 p111
- [5] Liebe C C 1995 *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* **10** 10
- [6] Liu L, Zhang L, Zheng X, Xu K, Ge S M 2007 *Infrared and Laser Engineering* **36** 529 (in Chinese) [刘垒, 张路, 郑辛, 余凯, 葛升民 2007 *红外与激光工程* **36** 529]
- [7] Cao Z X, Zhong H J, Zhang Y F, Li Q L 2018 *Aerospace Control and Application* **44** 46 (in Chinese) [曹中祥, 钟红军, 张运方, 李全良 2018 *空间控制技术与应用* **44** 46]
- [8] Virmonitois C, Goiffon V, Magnan P, Girard S, Inguimbert C, Petit S, Rolland G, Saint-Pe O 2010 *IEEE TNS.* **7** 3101
- [9] Virmonitois C, Goiffon V, Magnan P, Girard S, Saint-Pe O, Petit S, Rolland G, Bardoux A 2012 *IEEE TNS.* **59** 927
- [10] Zhou J T, Cai W, Wu Y P, Lu X 2010 *J. Astron.* **31** 24 (in Chinese) [周建涛, 蔡伟, 武延鹏, 卢欣 2010 *宇航学报* **31** 24]
- [11] Belenky A, Fish A, Spivak A, Yadid-Pecht O 2007 *IEEE Trans. Circuits Syst. Express Briefs.* **54** 1032
- [12] Goiffon V, Virmonitois C, Magnan P, Cervantes P, Place S, Gaillardin M, Girard S, Paillet P, Estriebeau M, Martin-Gonthier P 2012 *Trans. Nucl. Sci.* **59** 918
- [13] Liu J Q, Li J, Hao Z H 2016 *Optics and Precision Engineering* **14** 553 (in Chinese) [刘金国, 李杰, 郝志航 2016 *光学精密工程* **14** 553]
- [14] Yuan Z, Zhang H, Sun Y 2020 *5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)* Harbin, China Dec 25–27, 2020 p2485
- [15] EMVA1288 Working Group 2010 *EMVA Standard* 1288 (Frankfurt: European Machine Vision Association)

Influence mechanism and recognition algorithm of CMOS active pixel sensor radiation damage on star sensor star map recognition^{*}

Feng Jie^{1)2)†} Cui Yi-Hao¹⁾²⁾³⁾ Li Yu-Dong^{1)2)‡} Wen Lin¹⁾²⁾ Guo Qi¹⁾²⁾

1) (*Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

2) (*Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Devices, Urumqi 830011, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 6 May 2022; revised manuscript received 22 May 2022)

Abstract

In order to analyze the causes of star sensor performance degradation and attitude measurement accuracy reduction in space radiation environment, the total ionizing dose effects on complementary metal oxide semiconductor (CMOS) star sensor performance are studied. By using an established outfield star sensor test system, the Orion Nebula and the zenith direction of the sky are imaged. Through the experimental processes of star map data acquisition, star point extraction and star map matching, the influence mechanisms of complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor (CMOS APS) noises on background gray mean value of star map and number of identified stars are analyzed. A recognition algorithm for finding stars annihilated by radiated noise is proposed. Through theoretical derivation, the quantitative relationships between CMOS APS dark current noise, dark signal non-uniformity noise and photon response non-uniformity noise and star centroid positioning error are established. The γ radiation results show that the image gray-mean of the whole star map increases, the number of identified stars decreases, and the star point centroid positioning accuracy decreases, which seriously affect star map recognition of star sensor. This research provides a theoretical basis for the radiation-resistant reinforcement design of high precision star sensors.

Keywords: star sensor, radiation damage mechanism, star map recognition, complementary metal oxide semiconductor active pixel sensor, recognition algorithm

PACS: 42.88.+h, 61.80.Ed, 07.07.Df, 07.89.+b

DOI: 10.7498/aps.71.20220894

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12175307) and the Tianshan Youth Program of the Autonomous Region, China (Grant No. 2019Q85).

[†] Corresponding author. E-mail: fengjie@ms.xjb.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn

CMOS有源像素传感器辐射损伤对星敏感器星图识别影响机理与识别算法

冯婕 崔益豪 李豫东 文林 郭旗

Influence mechanism and recognition algorithm of CMOS active pixel sensor radiation damage on star sensor star map recognition

Feng Jie Cui Yi-Hao Li Yu-Dong Wen Lin Guo Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 184208 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220894

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220894>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于单片有源像素传感器的探测模块测试研究

Test study of detector modules based on monolithic active pixel sensor

物理学报. 2021, 70(17): 170702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210464>

高分辨紫外电子轰击互补金属氧化物半导体器件的实验研究

High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection

物理学报. 2018, 67(1): 014209 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171729>

65 nm互补金属氧化物半导体场效应和晶体管总剂量效应及损伤机制

Radiation effect and degradation mechanism in 65 nm CMOS transistor

物理学报. 2018, 67(14): 146103 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172542>

图像传感器像素化效应对菲涅耳非相干关联全息分辨率的影响

Influence of pixelation effect of image sensor on resolution of Fresnel incoherent correlation holography

物理学报. 2019, 68(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181844>

基于银纳米线电极-rGO敏感材料的柔性NO₂气体传感器

Flexible nitrogen dioxide gas sensor based on reduced graphene oxide sensing material using silver nanowire electrode

物理学报. 2020, 69(5): 058101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191390>

氧化钨纳米线气敏传感器的制备及其室温NO₂敏感特性

Tungsten oxide nanowire gas sensor preparation and P-type NO₂ sensing properties at room temperature

物理学报. 2018, 67(5): 058101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172236>