

## 面阵 CMOS 图像传感器性能测试及图像处理

董建婷, 杨小乐, 董杰

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

**摘要:** CMOS 图像传感器具有驱动简单、单电源供电、集成度高、功耗低、抗辐射能力强等优点。但是在航天光学遥感领域, CMOS 图像传感器应用还不普遍。在该领域亟需大规模、高读出速度、大动态范围的图像传感器, CMOS 图像传感器 LUPA4000 正是这样一款高性能面阵图像传感器, 因此, 选择 LUPA4000 作为研究对象, 对其缺陷像元、光响应非均匀性、信噪比等性能指标进行测试。测试结果表明存在缺陷像元数量多、光响应非均匀性较大、信噪比较低等问题。根据测试结果采用暗背景扣除、缺陷像元替换、非均匀校正三种方法进行图像处理。对每种方法单独处理和各种方法组合处理的处理效果从图像信噪比和成像图像质量两方面进行分析评估, 结果表明: 非均匀校正联合缺陷像元替换的处理方法处理效果最佳。

**关键词:** CMOS 图像传感器; 性能测试; 图像处理

**中图分类号:** TP212    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3396-06

## Performance test and image processing of area CMOS image sensor

Dong Jianting, Yang Xiaole, Dong Jie

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076)

**Abstract:** CMOS image sensor have the advantages of simple drive signals, single power supply voltage, high integration, low power consumption and strong radiation resistance. But in the field of space optical remote sensing, CMOS image sensor is not widely applied. The large-scale, high reading rate, high dynamic range CMOS image sensor is urgently in need. The 4 Megapixel CMOS image sensor of LUPA4000 is just such one. So LUPA4000 was chosen as the research target and its performance was tested. The image processing was conducted according to the results of performance test. In the research work, the parameters of defective pixels, response non uniformity (PRNU) and signal to noise ratio(SNR) were tested. The test results show that the CMOS image sensor of LUPA4000 has the following problems: the defective pixels are numerous, the PRNU is not ideal and the SNR is low. So the following image processing methods were adopted: dark background deduction to decrease the dark signal noise, defective pixels replacement to reduce the influence of defective pixels, and nonuniformity correction to reduce PRNU. The different processing combination among the three methods was applied. In order to evaluate the treatment effect of above processing combination, the contrasts of SNR and imaging quality between the original images and processed images were executed. The contrast results

收稿日期: 2013-04-11; 修订日期: 2013-05-15

基金项目: 国家 863 计划重点项目(2008AA121900)

作者简介: 董建婷(1978-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事航天光学遥感器系统测试与图像处理方面的研究。

Email: dongjt1978@sina.com

show that the method that combined defective pixels replacement with nonuniformity correction is the best combination.

**Key words:** CMOS image sensor; performance test; image processing

## 0 引言

在航天光学遥感领域, CCD 器件以其高灵敏度、低噪声、高动态范围、良好的成像质量等优点一直占据着图像传感器的主导地位。近年来,随着大规模集成电路技术和制造工艺的发展进步, CMOS 图像传感器的读出噪声越来越小, 成像质量不断提高。与 CCD 器件相比, CMOS 图像传感器具有驱动简单、单电源低电压供电、集成度高、功耗低、抗辐射能力强等优势, 因此具有极大的应用开发潜力。

由于 CMOS 图像传感器应用于航天遥感领域还不普遍, 缺乏工程试验数据和经验积累。因此选择一款性能指标较高的 CMOS 图像传感器并以其为基础进行 CMOS 成像系统的开发, 通过工程实践了解 CMOS 图像传感器的性能特点和图像处理方法, 积累一定的试验数据和经验, 对 CMOS 图像传感器在航天领域的应用具有重大的参考价值。在航天遥感应用领域, 亟需大规模、高读出速度、大动态范围的图像传感器, 而 LUPA4000 图像传感器正是一款高性能的高速大面阵 CMOS 面阵图像传感器, 因此选择 LUPA4000 作为研究对象, 对其性能进行评估测试, 并根据测试结果探讨图像处理方法。

## 1 LUPA4000 CMOS 图像传感器

LUPA4000 是 CYPRESS 公司生产的一款 400 万像素 CMOS APS 面阵传感器, 芯片内部集成了模拟图像信号的获取、模数转换和数字信号处理功能<sup>[1]</sup>。该器件的性能特点如下<sup>[2]</sup>:

(1) 有效像元数为  $2048 \times 2048$ , 像元尺寸为  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ; (2) 在最大分辨率下的最大帧速率为 15 帧/s; (3) 单斜率积分模式下, 动态范围为 66 dB, 在多斜率积分模式下, 最高可达 90 dB; (4) 片上集成了 2 路 10 bit A/D 转换器; (5) 具有随机开窗与亚采样功能, 帧速率可大幅提高; (6) 具有同步电子快门功能, 积分时间可调; (7) 可选择单抽头或双抽头读出, 单抽头最大像元读出速率为 66 MHz。

## 2 LUPA4000 性能测试

以 LUPA400 图像传感器为核心开发了一套成像测试系统, 如图 1 所示, 包括 LUPA4000 图像传感器及外围电路、测控计算机、积分球光源等。测试系统如图 1 所示, 其中外围电路提供 LUPA4000 工作所需的时序和电压, 并将数字图像数据传送给测控计算机处理; 测控计算机利用 Camera Link 图像采集卡实现数据采集、存储、显示、图像处理及积分时间控制功能。

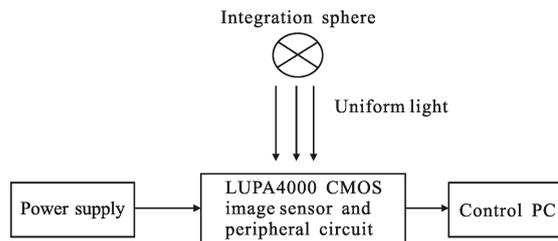


图 1 LUPA4000 CMOS 图像传感器测试系统

Fig.1 Test system of LUPA4000 CMOS image sensor

在测试系统中, LUPA4000 图像传感器的工作状态如下:

(1) 全窗口读出, 一帧数据像元数目为  $2048 \times 2048$ ; (2) 单斜率积分模式; (3) 单抽头读出, 像元读出速率为 20 MHz; (4) 数字图像数据 10 bit 并行输出; (5) 积分时间可调, 调节范围 0.01 ms~20 s, 调节步长 0.1 ms。

为了对 LUPA4000 的性能进行摸底, 对 LUPA4000 图像传感器的缺陷像元、光响应非均匀性、信噪比等技术指标进行了测试。

### 2.1 缺陷像元

由于在制造工艺和材料等方面存在的不足, 图像传感器总会存在一少部分感光不正常的单元, 一般称之为缺陷像元<sup>[3]</sup>。这些缺陷像元通常表现为暗点或者亮点。参考 CCD 坏点检测<sup>[4]</sup>和红外探测器盲元检测<sup>[5]</sup>, CMOS 图像传感器缺陷像元检测的方法如下:

(1) 在无光照条件下, 采集多帧图像, 设所有像元的平均响应为  $V_d$ , 每个像元的平均响应为  $V_{di}$ ; (2) 调节积分球光强, 使器件处于半饱和输出, 采集多帧图

像,设所有像元的平均响应为 $\bar{V}_R$ ,每个像元的平均响应为 $V_{Ri}$ ;(3) 将符合公式(1)的像元标记为缺陷像元。

$$V_{di} \geq X\bar{V}_d \text{ 或 } V_{Ri} \geq Y\bar{V}_R \text{ 或 } V_{Ri} \leq Z\bar{V}_R \quad (1)$$

式中: $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 的取值,根据大量实验和缺陷像元替换效果分析,选取  $X=10, Y=1.3, Z=0.7$ 。

在环境温度 24℃,积分时间 20 ms 的情况下,对 LUPA4000 图像传感器进行了缺陷像元检测。测试结果如表 1 所示。

表 1 LUPA4000 缺陷像元测试结果

Tab.1 Test result of defective pixels for LUPA4000

Defective pixels in dark background (>10×signal mean)	Bright defective pixels in half saturation (>1.3×signal mean)	Dark defective pixels in half saturation (<0.7×signal mean)	Total defective pixels
17 367	438	0	17 371

由表 1 可知,缺陷像元数为 17371,占总像元数的 0.41%,其中在暗背景下响应过亮的缺陷像元居多。

根据缺陷像元的坐标位置,将缺陷像元在图像中用亮点表示(灰度值 255),其他非缺陷像元用暗点表示(灰度值 0)形成一幅缺陷像元分布图像,如图 2 所示。



图 2 LUPA4000 缺陷像元分布图

Fig.2 Distribution picture of defective pixels for LUPA4000

从缺陷像元分布图可看出,参加测试的 LUPA4000 图像传感器的缺陷像元是零星分布的,无明显缺陷簇。

2.2 光响应非均匀性 PRNU

光响应非均匀性通常采用以下两种测试方法。

(1) 标准均方根偏差:有效像元输出信号的均方根偏差与有效像元输出信号的平均值的比值,通常用百分比表示。

(2) 峰峰值:有效像元输出信号的最大值减去最小值与平均值之比值。通常用百分比表示。

在此采用标准均方根偏差法进行测试,按照公式(2)计算 CMOS 图像传感器的光响应非均匀性 PRNU。

$$PRNU = \frac{1}{\bar{V}_o} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (\bar{V}_{oi} - \bar{V}_o)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\bar{V}_o$ 为器件平均输出信号; $M$ 为光敏面像元数目; $\bar{V}_{oi}$ 为第*i*像元的输出信号。

按照以上方法,在环境温度 24℃,器件处于半饱和状态时,参加测试的 LUPA4000 图像传感器的光响应非均匀性为 2.09%。

2.3 信噪比

改变图像传感器的曝光量,在不同曝光量下测试信噪比。

按照公式(3)计算器件的信噪比。

$$SNR = 20 \times \log \frac{V_{OS}}{V_{NRMS}} \quad (3)$$

式中: $V_{OS} = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M V_{oi}$ ;  $V_{NRMS} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (V_{oi} - V_{OS})^2}$ ,  $M$ 为光敏面像元数目, $V_{oi}$ 为第*i*像元的输出信号, $V_{OS}$ 为器件的平均输出信号, $V_{NRMS}$ 为输出信号的均方根偏差。

设 LUPA4000 的饱和时的输出信号为  $V_{sat}$ ,对 LUPA4000 图像传感器测试其输出信号值为 10%  $V_{sat}$ 、30%  $V_{sat}$ 、50%  $V_{sat}$ 、70%  $V_{sat}$  和 90%  $V_{sat}$  等情况下的信噪比。测试结果如表 2 所示。

表 2 LUPA4000 信噪比测试结果

Tab.2 Test result of SNR for LUPA4000

Signal mean/mV	Noise/mV	SNR/dB	Remark
108.209 5	27.160 4	12.006 6	10% $V_{sat}$
241.262 1	18.016 3	22.536 5	30% $V_{sat}$
433.039 7	10.993 6	31.907 8	50% $V_{sat}$
595.542 4	7.537 4	37.953 8	70% $V_{sat}$
784.565 2	5.968 9	42.374 7	90% $V_{sat}$

3 图像处理方法

CMOS 图像传感器在实际应用中的主要问题是噪声较大,通过对 CMOS 图像传感器的性能测试也验证了该问题,参加测试的 LUPA4000 图像传感器缺陷像元数量多、光响应非均匀性较大、信噪比低,

若要将该图像传感器应用于航天领域,需要对其进行图像处理。CMOS 图像传感器的噪声包括随机噪声和固定图形噪声<sup>[6-7]</sup>,在实际应用中,固定模式噪声的影响要大于随机噪声,降低固定模式噪声对改善图像质量至关重要。固定模式噪声主要包含暗信号非均匀性噪声和光响应非均匀性噪声。结合 CMOS 图像传感器的固定模式噪声特点和缺陷像元数目较多的情况,对成像图像进行缺陷像元替换以减小缺陷像元的影响,利用暗背景扣除降低暗信号固定模式噪声、利用非均匀校正降低光响应非均匀性固定模式噪声。

### 3.1 暗背景扣除

CMOS 图像传感器与 CCD 相比,暗电流要大得多,由于各像素间的暗电流不均匀,因此即使没有入射光也会造成暗信号固定模式噪声。此外,造成 CMOS 图像传感器暗信号固定模式图像噪声最大的

因素是像素放大器的偏差,其中与光通量无光的偏移性偏差影响较大。无光照情况下拍摄的暗背景图像含有像素放大器阈值偏差与暗电流偏差的成分,如果从成像图像中减去暗背景图像,从理论上讲即可有效的去除大部分暗信号固定模式噪声<sup>[8]</sup>。由于暗背景图像与积分时间及温度相关,在环境变化的条件下需要重新采集暗背景图像,这给该方法的实际操作带来了困难。

### 3.2 缺陷像元替换

当缺陷像元被标定后,其数量和位置一般情况下不会发生改变,除非是器件性能劣变或受到破坏时,需要重新标定<sup>[5]</sup>。一旦缺陷像元被检测标定后,就可采用盲元替换算法进行替换。通过对 LUPA4000 的缺陷像元检测可知,其缺陷像元皆为孤立的,不存在缺陷像元簇,所以采用缺陷像元周围的 8 个像元进行线性插值补偿。

$$D(i, j) = \begin{cases} (D(i, j+1)+D(i+1, j)+D(i+1, j+1))/3, (i=1, j=1) \\ (D(i, j-1)+D(i+1, j-1)+D(i+1, j))/3, (i=1, j=2048) \\ (D(i, j-1)+D(i, j+1)+D(i+1, j-1)+D(i+1, j+1))/5, (i=1, 1 < j < 2048) \\ (D(i-1, j)+D(i-1, j+1)+D(i, j+1))/3, (i=2048, j=1) \\ (D(i-1, j-1)+D(i-1, j)+D(i, j-1))/3, (i=2048, j=2048) \\ (D(i-1, j-1)+D(i-1, j)+D(i-1, j+1)+D(i, j-1)+D(i, j+1))/5, (i=2048, 1 < j < 2048) \\ (D(i-1, j)+D(i-1, j+1)+D(i, j+1)+D(i+1, j)+D(i+1, j+1))/5, (1 < i < 2048, j=1) \\ (D(i-1, j-1)+D(i-1, j)+D(i, j-1)+D(i+1, j-1)+D(i+1, j))/5, (1 < i < 2048, j=2048) \\ (D(i-1, j-1)+D(i-1, j)+D(i-1, j+1)+D(i, j-1)+D(i, j+1))+ \\ D(i+1, j-1)+D(i+1, j)+D(i+1, j+1))/8, (1 < i < 2048, 1 < j < 2048) \end{cases} \quad (4)$$

如图 3 所示,对应于不同位置的缺陷像元,第  $i$  行、第  $j$  列的缺陷像元的处理方法分别如下。

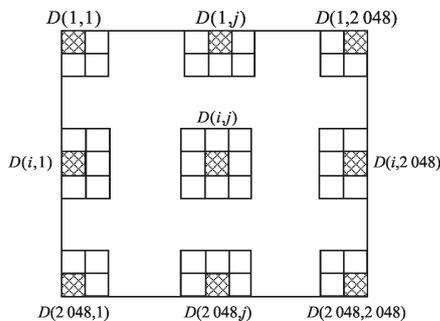


图 3 缺陷像元位置分类示意图

Fig.3 Sketch map of location type for defective pixels

### 3.3 非均匀校正

对图像传感器的非均匀校正技术主要包括基于标定的校正方法和基于场景的校正方法<sup>[9]</sup>。由于 CMOS 图像传感器在一段时间内的特性比较稳定,所以适合采用基于标定的校正方法。其中两点非均匀校正技术是最直接、最基本的技术,在航天遥感成像系统中获得了广泛的应用。

对于两点校正算法,校正公式如下:

$$Y_{i,j} = G_{i,j} \times X_{i,j} + O_{i,j} \quad (5)$$

其中:

$$G_{i,j} = \frac{Y_H - Y_L}{X_{i,j}(\phi_H) - X_{i,j}(\phi_L)}; O_{i,j} = \frac{Y_H \times X_{i,j}(\phi_L) - Y_L \times X_{i,j}(\phi_H)}{X_{i,j}(\phi_L) - X_{i,j}(\phi_H)}$$

式中:  $X_{i,j}$  为原始输出;  $Y_{i,j}$  为校正后的输出;  $G_{i,j}$  为增益校正系数,  $O_{i,j}$  为偏置校正系数。校正系数  $G_{i,j}$  和  $O_{i,j}$  可通过器件在不同亮度均匀光源下的定标结果计算得出。定标点一般为两点, 一个低亮度定标点  $\phi_L$  和一个高亮度定标点  $\phi_H$ ,  $Y_H$  和  $Y_L$  分别为低亮度定标点  $\phi_L$  和高亮度定标点  $\phi_H$  下整幅图像的平均输出值,  $X_{i,j}(\phi_L)$  和  $X_{i,j}(\phi_H)$  分别为低亮度定标点  $\phi_L$  和高亮度定标点  $\phi_H$  的第  $i$  行、第  $j$  列像元的输出值。

### 3.4 图像处理结果及分析

对均匀光照下, 不同积分时间的图像(图像信号均值覆盖 10% V<sub>sat</sub>~90% V<sub>sat</sub>) 分别进行暗背景扣除、缺陷像元替换、非均匀校正处理以及不同处理组合的研究, 不同处理方式下的信噪比改善情况如图 4 所示。

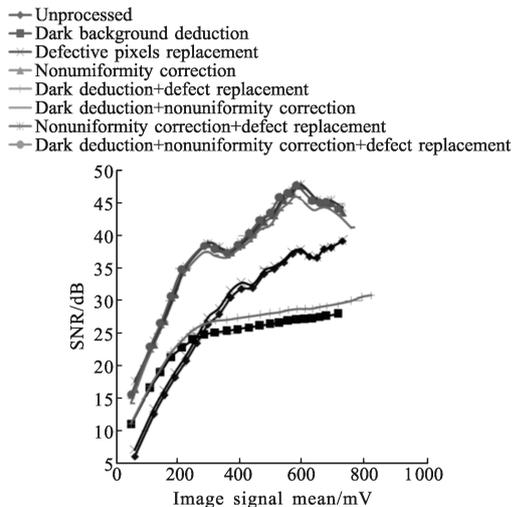


图 4 不同处理方法对信噪比的改善情况对比图

Fig.4 Contrast of SNR among different processing methods

根据图像信噪比和图像成像质量的改善情况, 针对不同处理方法有如下结论:

(1) 单独采用背景扣除的处理方法: 在低照度成像时, 能在一定程度上提高图像信噪比, 从图像上看能消除大部分白点噪声和小部分条纹噪声, 大部分条纹噪声仍比较明显; 在高照度成像时, 图像信噪比不升反降, 从图像上看能消除小部分条纹噪声, 但增加了众多黑点, 因此图像成像效果不如原始图像。造成此现象的原因是, 原始图像中虽然也存在白点噪声, 但由于在高照度时图像整体亮度较大, 所以白点噪声显得并不明显, 该白点噪声通过背景扣除处理后, 信号值大幅降低, 所以在图像上显示为比较明显的黑点。对于 CMOS 图像传感器, 在低照度时暗信号

非均匀性引起的固定模式噪声是主要噪声源, 随着光强的增加, 光响应非均匀性引起的固定模式噪声的影响越来越大, 所以想单独利用背景扣除处理就在整个成像区间达到较好的处理结果是不现实的。

(2) 单独采用缺陷像元替换的处理方法: 信噪比无太大改善, 平均约有 0.5 dB 的提高, 在图像接近饱和时, 信噪比改善极微小。从图像上看主要去除了亮度较大的白点噪声, 还有大部分白点噪声未去除, 对条纹噪声无改善。

(3) 单独采用非均匀校正的处理方法: 在整个响应区间, 对信噪比和成像质量均有较大改善。利用非均匀校正处理可以去除大部分白点噪声和条纹噪声, 只有部分亮度较大的白点噪声未能完全去除, 这些白点处理后有部分仍保持为白点, 有部分校正后亮度降低很多, 表现为偏暗的暗点, 但都与周围像元差别不大, 看上去不太明显, 所以整幅图像目视效果较好。

(4) 不同组合的处理方法: 对三种处理方法两两组合和三种处理方法联合使用的进行研究。从信噪比看, 暗背景扣除+非均匀校正、暗背景扣除+非均匀校正+缺陷像元替换和非均匀校正+缺陷像元替换这三种组合对信噪比的改善较大, 与单独采用非均匀校正处理的方法相当, 相同输出信号值时信噪比差值在 1 dB 以内。从数值上细分, 对信噪比的改善程度依次为非均匀校正+缺陷像元替换>非均匀校正>暗背景扣除+非均匀校正+缺陷像元替换>暗背景扣除+非均匀校正。其中三种处理方法联合使用与非均匀校正+缺陷像元替换处理对噪声的改善程度大致相同, 由于扣除背景造成信号值降低, 所以三种方法联合使用时的信噪比不如非均匀校正+缺陷像元替换处理的信噪比。从成像图像上看三种方法联合使用与非均匀校正+缺陷像元替换处理后的图像质量大致相同, 处理效果最佳, 目视图像平滑, 无明显白点、黑点和条纹噪声。暗背景扣除+非均匀校正与非均匀校正处理大致相同, 处理效果较佳, 图像平滑, 无明显条纹噪声, 图像放大浏览时可发现有小部分的亮点和黑点噪声存在, 由此可见缺陷像元替换可以去除非均匀校正处理无法完全消除的瑕疵点噪声。

综合以上分析, 三种方法联合使用和非均匀校正+缺陷像元替换的处理方法能取得最佳的处理效果。由于暗背景扣除在不同积分时间和温度发生变化时, 需要进行采集背景, 这样会大大加大工作量,

且实际应用时不易操作,所以从工程实践方面考虑,不建议采用包含背景扣除的联合处理方法,非均匀校正+缺陷像元替换的处理方法是最佳的选择。

均匀光照下,利用非均匀校正+缺陷像元替换处理方法对成像图像进行处理,处理前后成像效果对比见图 5。从图 5 可看出,通过图像处理,原始图像中的白点噪声和条纹噪声被消除,图像平滑均匀,图像灰度值分布更加集中。经过数值计算,原始图像,信号均值=447.89 DN,均方差噪声=11.42 DN,信噪比 SNR=31.87 dB,光响应非均匀性 PRNU=2.56%;处理后的图像,信号均值=447.84 DN,均方差噪声=4.63 DN,信噪比 SNR=39.71 dB,光响应非均匀性 PRNU=1.04%。

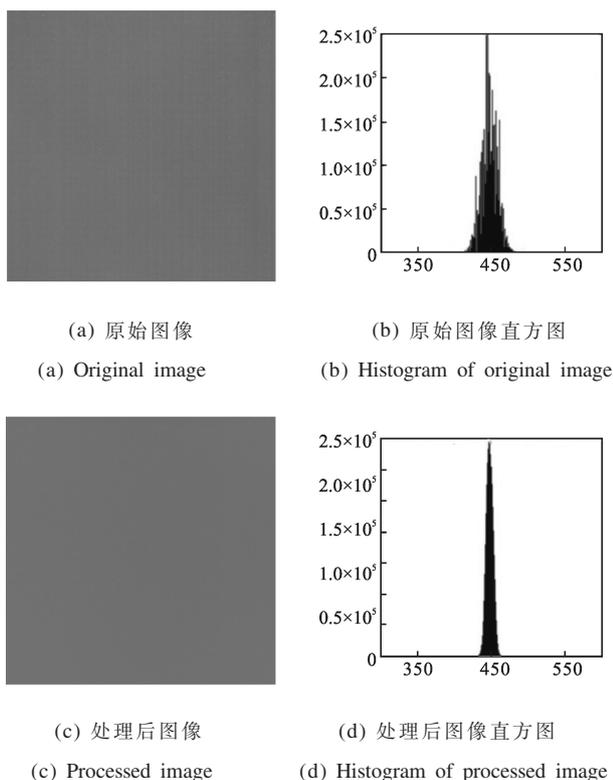


图 5 非均匀校正+缺陷像元替换处理效果对比图

Fig.5 Contrast of image quality between the original image and the processed image by the method combined nonuniformity correction with defective pixels replacement

## 4 结论

面阵 CMOS 图像传感器 LUPA4000 的性能测试

表明,CMOS 图像传感器存在信噪比和响应非均匀性较差、缺陷像元较多的问题,需要对其进行去噪处理。文中对 CMOS 图像传感器的数字图像处理方法进行了研究,研究表明非均匀校正处理和缺陷像元替换的组合处理可以有效降低图像噪声,提高图像质量,是最佳的处理方法。若要将 CMOS 图像传感器推广应用于航天遥感领域,还需要对其空间环境的适应能力进行摸底试验,探索辐照加固技术,这也是下一步的工作目标和研究方向。

## 参考文献:

- [1] Chen Yan, Zhang Hongwei, Lin Hongyu. The timing diagram design for high speed CMOS image sensor of LUPA-4000 [C]//Proceedings of the Twenty-third Session of Space Exploration Conference, 2010. (in Chinese)
- [2] Cypress Semiconductor Corporation. LUPA4000 4 Megapixel CMOS Image Sensor Datasheet[Z]. 2007.
- [3] Bart Dierickx, Guy Meynants. Missing pixel correction algorithm for image sensor[C]//SPIE, 1998, 34(10): 200-203.
- [4] Li Tianhua, Dong Shuijin. Utilize test software for CCD digital image devices' dead dot and noise dot [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2007, 9(4): 113-115. (in Chinese)
- [5] Zhou Huixin, Wei Yajiao, Qin Hanlin, et al. Blind-pixel iterative detection algorithm based on double threshold for uncooled IRFPA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 795-799. (in Chinese)
- [6] Zou Yiping. Research on image noise suppression of CMOS image sensor [D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication, 2009. (in Chinese)
- [7] Luo Bin, Yan Lei, Yang Fuxing. Research of noise suppression for CMOS image sensor [C]//2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2010.
- [8] Kazuya Yonemoto. Fundamentals and Applications On CCD/CMOS Image Sensor [M]. Beijing: Science Press, 2006: 156-175. (in Chinese)
- [9] Cai Sheng, Bai Xuguang, Qiao Yanfeng. Summarize on the nonuniformity correction algorithms for IRFPA based on calibration[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(10): 589-592. (in Chinese)