

大面阵全帧转移 CCD 光子转移曲线的数据处理和校正方法

李 金^{1*}, 马媛媛¹, 许优华², 何 彬¹, 刘 娅¹

(1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘 要: 大面阵全帧转移 CCD 因阵列规模大, 不仅存在一定比例的坏像元, 且器件内部普遍存在 brighter-fatter 效应。这将影响由图像数据计算的时域方差值和灰度均值, 导致器件光子转移曲线的计算不准确, 影响利用光子转移曲线结果进行进一步计算的器件参数的精准度。为提高大面阵全帧转移 CCD 探测器光子转移曲线非线性评价的准确性, 文章提出一种图像处理和校正方法。该方法通过对图像数据分块、合并、剔除坏像元, 校正坏像元引起的图像时域方差变小问题, 减小 brighter-fatter 效应引起的相邻像元相关性, 进而提高器件光子转移曲线的非线性和多通道增益的准确度。结果表明, 器件光子转移非线性平均提高 97%, 同一器件的各通道增益经过图像处理均修正在同一增益范围内。所提算法提升了大面阵全帧转移 CCD 器件的测试准确度和测试效率, 对超高分辨率科学仪器用探测器的研究具有重要应用价值和指导意义。

关键词: 大面阵全帧转移 CCD; 光子转移曲线; 图像数据处理

中图分类号: TP391.41 **文章编号:** 1001-5868(2026)04-0638-05

Research on Data Processing and Correction Methods for Photon Transfer Curves of Large-Format Full-Frame Transfer CCD

LI Jin¹, MA Yuanyuan¹, XU Youhua², HE Bin¹, LIU Ya¹

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN; 2. National Astronomical Observatories of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, CHN)

Abstract: Large-format full-frame transfer charge-coupled devices (CCDs) feature large array sizes, and their output images typically contain defective pixels. In addition, the brighter-fatter effect exists widely in CCD detectors. Both factors affect the temporal variance and gray-scale mean calculated from image data, resulting in inaccurate measurement of the devices' photon transfer curve and a significant reduction in the accuracy of device parameter estimation. To improve the accuracy of evaluating the photon transfer curve nonlinearity for large-format full-frame transfer CCD detectors, this study investigated image processing and correction methods. By partitioning, merging image data, and eliminating defective pixels, the problem of reduced temporal variance of images caused by defective pixels was corrected, the correlation between adjacent pixels induced by the brighter-fatter effect was reduced, and the accuracy of evaluating the photon transfer curve nonlinearity and multi-channel gain of the device was improved. The results show that the photon transfer nonlinearity of the device was improved by an average of 97%, and the gains of all channels of the same device were corrected to a common range after image processing. The proposed algorithm enhanced the

收稿日期: 2026-03-17.

* 通信作者: 李 金

measurement accuracy and efficiency of large-format full-frame transfer CCDs, which has significant practical value and may guide future research on detectors used in ultra-high-resolution scientific instruments.

Key words: CCD; photon transfer curve; image data processing

0 引言

大面阵全帧转移 CCD 是对宇宙进行大规模深度实时监测、建立宇宙模型、对宇宙中暗物质进行深入研究的关键部件^[1]。目前,国外詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)已在轨运行,国内巡天空间望远镜(CSST)也在积极研究筹备中^[2]。光子转移曲线表征 CCD 在不同均匀光照下的响应性能,其由各光照下图像灰度均值与时域方差差值绘制(横纵坐标分别为灰度均值和时域方差差值),曲线线性部分拟合斜率即为器件增益^[3-4]。在大面阵电荷耦合器件测试过程中,首先通过光子转移曲线判断器件是否具备测试全参数的条件,再基于其线性增益计算大面阵 CCD 器件的噪声、暗电流、满阱、像元间响应非均匀性、量子效率等性能参数。因此,良好的光子转移曲线是准确表征大面阵 CCD 器件性能参数的有效手段^[5]。

大面阵全帧转移 CCD 规模达 $10\text{k} \times 10\text{k}$, 大量数据同时读出导致输出时间大幅延迟,同时测试电路引入的噪声相应增大,两者均可能掩盖真实数据信息,且此噪声无法彻底消除。为了保证全帧同时输出的图像质量,测试电路将器件的有效像元分成 16 通道同时输出,单通道数据输出规模为 $5\text{k} \times 2\text{k}$, 既减少测试时间也降低测试电路引入的噪声,器件的光子转移曲线按照各单通道的数据分别进行计算。由于大面阵全帧转移 CCD 的阵列规模较大,输出图像存在部分坏像元。该坏像元会影响单帧单通道图像数据的时域方差,该方差值作为光子转移曲线的纵坐标,将导致光子转移曲线测量绘制不准确。因此,需判断 CCD 的工作状态和全参数测试状态是否良好,同时采用图像预处理方法剔除坏像元,以保证测量绘制出准确的光子转移曲线。CCD 曝光过程中,像元内电荷累积溢出会引起 brighter-fatter 效应,增大相邻像元间的相关性,该效应在 CCD 中广泛存在^[6]。计算光子转移曲线的方差时,由于 brighter-fatter 效应造成邻近像元的相关性增大,图像的实际方差计算值低于理想方差值。曝光时间增长使像元内电荷持续累积,溢出加剧,

brighter-fatter 效应随之增强,导致光子转移曲线显著偏离线性,非线性偏差增大。因此,在大面阵全帧转移 CCD 光子转移测试过程中,需对图像数据进行坏像元剔除处理并降低 brighter-fatter 效应的影响。

综上,针对全帧转移大面阵 CCD 中坏像元和 brighter-fatter 效应导致光子转移曲线非线性劣化、影响器件性能评估的问题,本文提出一种图像数据处理与校正方法,有效改善了曲线线性度并提升了增益标定的准确性。

2 大面阵全帧转移 CCD 亮场测试系统架构

大面阵全帧转移 CCD 器件亮场图像测试系统示意图如图 1 所示,该测试系统由暗箱、光源、温度控制设备和计算机组成。

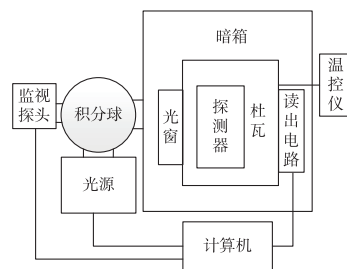


图1 亮场图像测试系统

采用温控仪对探测器进行实时监控,并通过光源积分球将均匀光照至探测器光敏面上进行光电参数测试。监视探头实时监控光源在积分球中的均匀性,并反馈至计算机^[7]。在杜瓦装置中加入液氮,利用碳化硅的传导性对探测器进行制冷;同时,通过加热器进行热补偿,使探测器温度控制在工况温度,并维护长时间稳定^[8-9]。测试电路可对探测器在不同曝光时间的亮场多帧图像进行采集。

测试中,由光子转移曲线导出的转换增益是关键参量,直接影响噪声、暗电流、满阱电荷等参数评估精度。随着曝光时间的增加,器件图像方差值因 brighter-fatter 效应低于理想方差值,光子转移曲线纵坐标值随之减小。在器件的制作过程中,芯片表

面会出现少量暗像元或亮像元缺陷,该缺陷在器件进行均匀光成像时会影响器件响应均值和方差值,使光子转移曲线数据不准确。因此,需要对图像数据进行必要的修正,以保证光子转移曲线的测试准确度。

3 图像数据处理

3.1 图像的坏像元处理方法

大面阵全帧转移 CCD 器件的图像数据通过 16 通道分别输出,全部通道的完整输出图像包含感光区域与非感光区域,经图像拼接处理后可显示全部感光区域的 $10\text{k} \times 10\text{k}$ 图像,如图 2 所示。



图2 大面阵全帧转移 CCD 器件亮场图像

本文将 CCD 全帧图像按通道进行划分,先将单通道感光区域均匀分割成 400×400 阵列规模的小区域,再计算每一块域内的中值和标准偏差,并将每块小区域中像元值偏离中值 4σ 以上的像元点进行剔除,见图 3。按照上述方法进行多次循环直至收敛,最后将坏像元引起的图像异常值替换成当前小区域多次循环收敛后的中值,从而减小坏像元对 CCD 光子转移曲线的影响。

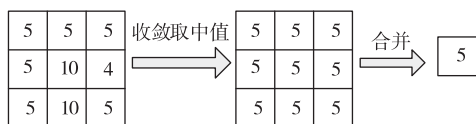


图3 异常值剔除过程示例

3.2 减少 brighter-fatter 效应的数据处理方法

在不同均匀光照下,随着光强增大,CCD 中的 brighter-fatter 效应逐渐加剧,电荷溢出至邻近像元的数量变多,相邻像元的相关性增大。上述因素共同作用,使实测光子转移曲线相较于理论曲线发生明显偏移,由此拟合得出的转换增益值^[10]不准确,进而影响器件基本光电参数的正确评估。

为了降低 brighter-fatter 效应对 CCD 器件光子转移曲线的影响,需对像元进行合并和取均值处

理。局部小阵列的像元合并可抑制器件像元内累积电荷随光照强度的增强而增多,减少溢出到邻近像元的电荷量,有效降低像元间的相关性。该算法首先将单通道的感光区域均匀分割成阵列规模为 200×200 像元的区域,然后对该阵列区域内的相邻 16 个像元按照 4×4 阵列方式合并为一个伪像元,再计算该伪像元的均值并代替原始像元值。16 个像元合并的计算式为:

$$D_{k,m} = \frac{1}{16} (M_{i-2,j-2} + M_{i-2,j-1} + M_{i-2,j} + M_{i-2,j+1} + M_{i-1,j-2} + M_{i-1,j-1} + M_{i-1,j} + M_{i-1,j+1} + M_{i,j-2} + M_{i,j-1} + M_{i,j} + M_{i,j+1} + M_{i+1,j-2} + M_{i+1,j-1} + M_{i+1,j} + M_{i+1,j+1}),$$

$$k, m \in [1, 50], i, j \in [1, 200] \quad (1)$$

式中, $D_{k,m}$ 代表合并后 50×50 阵列规模的像元图像数据, $M_{i,j}$ 代表合并前 200×200 阵列规模的像元图像数据。

全帧图像经过像元合并得到 2 500 个 50×50 阵列区域,分别进行 trimmed mean 计算,并对 50×50 阵列区域内的像元进行异常值剔除。trimmed mean 计算公式为:

$$\bar{X}_\alpha = \frac{X_{(n\alpha+1)} + X_{(n\alpha+2)} + \cdots + X_{(n-n\alpha)}}{n - 2n\alpha} \quad (2)$$

式中, α 表示截尾系数, $\alpha = m/n$, n 表示数据个数, m 表示去掉的数据个数; $X_{(1)}, X_{(2)}, \cdots, X_{(n)}$ 表示将数据升序排列后的顺序。

对小区域进行 trimmed mean 计算剔除异常值后,在新合成的单帧图像内使用 σ -clipping 再次进行异常值剔除,具体流程见图 4。绘制器件光子转移曲线时,将得到的分块数据合并取均值得到光子转移曲线横坐标单帧图像均值,将分块数据进行方差计算得到光子转移曲线纵坐标单帧图像方差值。

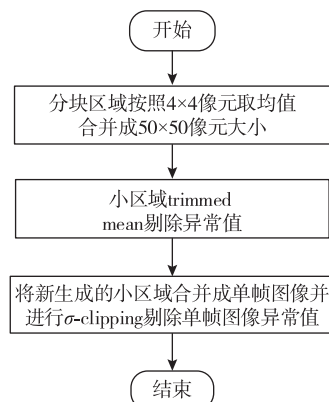


图4 图像处理流程

4 实验与结果分析

CCD 器件在亮场图像测试系统中制冷至 -85°C 并稳定 10 分钟后,测试系统开始进行图像采集,在系统可设置的最小曝光时间下,拍摄两帧图像作为器件在亮场图像测试系统中的本底数据。不同曝光量下的图像数据,均需扣减系统在最小曝光时间下拍摄的两帧图像数据的均值,以消除亮场图像测试系统中快门对不同曝光量下采集到的图像数据的影响。

在每个曝光时间 t_i 下,采集两帧图像数据,分别记为 $P_{i,1}$ 和 $P_{i,2}$;在系统最小曝光时间下,采集两帧图像数据,分别记为 $P_{0,1}$ 和 $P_{0,2}$ 。计算器件光子转移曲线的图像数据可表示为:

$$D_i=(P_{i,1}+P_{i,2}-P_{0,1}-P_{0,2})/2 \tag{3}$$

式中, D_i 为经最小曝光时间本底校正后的 t_i 曝光图像,用于消除快门效应。

表 1 是器件通道 1,2,15,16 未经过数据处理和经过数据处理后 CCD 光子转移曲线非线性数据。

表 1 器件编号 01 光子转移曲线非线性

通道	光子转移曲线非线性	未经过图像处理非线性度	经过图像处理非线性度
1	14~56 ke ⁻ 非线性度	64.67%	3.22%
	7~70 ke ⁻ 非线性度	132.00%	4.20%
2	14~56 ke ⁻ 非线性度	314.11%	4.13%
	7~70 ke ⁻ 非线性度	330.09%	4.66%
15	14~56 ke ⁻ 非线性度	85.41%	3.27%
	7~70 ke ⁻ 非线性度	92.32%	3.67%
16	14~56 ke ⁻ 非线性度	190.41%	4.32%
	7~70 ke ⁻ 非线性度	193.52%	4.26%

由表 1、图 5~9 可知,在制冷条件下采集的亮场图像原始数据中,通道 1,2,15,16 原始图像存在明显的亮缺陷和暗缺陷。在没有对缺陷进行处理的情况下,光子转移曲线非线性结果非常差。通过对存在缺陷的原始图像数据进行分块、合并、异常值剔除等图像处理,光子转移曲线非线性结果有明显的改进。

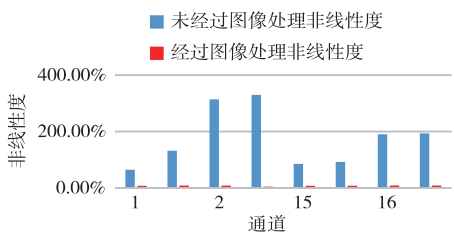


图 5 器件编号 01 通道 1,2,15,16 图像数据处理前后非线性对比



图 6 通道 1 部分原始图像数据



图 7 通道 2 部分原始图像数据

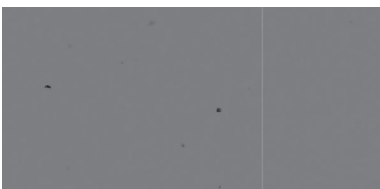


图 8 通道 15 部分原始图像数据



图 9 通道 16 部分原始图像数据

表 2 是器件通道 1,2,15,16 数据未经过数据处理和经过数据处理后 CCD 器件通道增益。从表 2 可知,存在缺陷的原始图像数据不仅对光子转移曲线非线性结果有明显影响,对器件各通道增益也有影响。同一器件不同通道的增益值应在一个大致相同的范围,不应存在明显的差异,但图像中缺陷导致编号 01 的器件通道 1,2,15,16 的增益值差异较大且不在同一范围。将存在缺陷的原始图像数据进行分块、合并、异常值剔除等图像处理,各通道增益在同一范围内。通道增益能对 CCD 器件中的噪声、暗电流、满阱电荷等众多光电参数进行准确评估。

表 2 器件编号 01 增益

通道	未经过图像处理通道增益/(e ⁻ /DN)	经过图像处理通道增益/(e ⁻ /DN)
1	0.86	2.46
2	4.84	2.48
15	1.64	2.59
16	1.55	2.43

5 结论

针对全帧转移大面阵电荷耦合器件的坏像元和 brighter-fatter 效应导致光子转移曲线变差、无法准确评估 CCD 器件的参数和性能等问题,提出一种图像数据处理、校正方法。采用对图像数据进行分块、合并取均值、异常值剔除,将图像中存在的部分坏像元进行修正,减小 brighter-fatter 效应带来的像元之间的相关性,提高光子转移曲线计算结果。实验数据表明:CCD 器件光子转移非线性平均提高 97%,同一器件的各通道增益经过图像处理均修正在同一增益范围内;正确的增益为器件中的噪声、暗电流、满阱电荷等光电参数的评估奠定基础。该图像处理方法简单易运行,可应用于大面阵 CCD 器件光子转移曲线的评估。

参考文献:

- [1] 李正映,魏勇,王誉棋.哈勃空间望远镜的宇宙寻踪[J].现代物理知识,2022,34(2):17-23.
Li Zhengying, Wei Yong, Wang Yuqi. Space pursuit of Hubble space telescope [J]. Modern Physics, 2022, 34(2): 17-23.
- [2] 詹虎.载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天[J].科学通报,2021,66(11):1290-1298.
Zhan Hu. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(11): 1290-1298.
- [3] ESCC Basic Specification electro-optical Test Methods for Charge Coupled Devices[S]. Issue 2. European Space Agency, 2014.
- [4] 冯婕,李豫东,文林,等. CMOS 图像传感器光子转移曲线辐照后的退化机理[J].光学精密工程,2017,25(10):2676-2681.
Feng Jie, Li Yudong, Wen Lin, et al. Degradation mechanism for photon transfer curve of CMOS image sensor after irradiation [J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 2676-2681.
- [5] Janesick J R. Scientific Charge-Coupled Devices [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [6] Antilogus P, Astier P, Doherty P, et al. The brighter-fatter effect and pixel correlations in CCD sensors [J]. Journal of Instrumentation, 2014, 9(3): C03048.
- [7] 马媛媛,李燕东,唐遵烈,等.基于行过扫数据降低大面阵 CCD 图像噪声算法研究[J].半导体光电,2024,45(2):206-210.
Ma Yuanyuan, Li Yandong, Tang Zunlie, et al. Algorithms to reduce noise in CCD using line overscan data [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(2): 206-210.
- [8] 闫阿奇,杨建峰,曹剑中.大面阵 CCD 航空数码相机光学系统设计[J].光学学报,2011,31(6):229-232.
Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong. Optical design of aerial digital camera based on large planar array CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 229-232.
- [9] 姚萍萍,孙亮,许孙龙,等.科学级 CCD 制冷系统设计及其温度特性分析[J].光学学报,2020,40(17):21-27.
Yao Pingping, Sun Liang, Xu Sunlong, et al. Design of a scientific-grade CCD refrigeration system and analysis of its thermal characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 21-27.
- [10] 李金,杨洪,孙晨,等.1 920×1 080 元高灵敏行间转移 CCD 图像传感器[J].半导体光电,2025,46(1):10-15.
Li Jin, Yang Hong, Sun Chen, et al. A 1 920 × 1 080 interline transfer CCD image sensor with high output sensitivity [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(1): 10-15.

作者简介:

李金(1982—),男,高级工程师,主要从事图像传感器测试技术研究。