光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023121702

基于行过扫数据降低大面阵 CCD 图像噪声算法研究

马媛媛*，李燕东，唐遵烈，李　金，张　娜，凌茂真，何　彬
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对全帧转移大面阵电荷耦合器件(CCD)多帧图像数据随时间漂移的现象和测试电路引入的噪声，导致无法准确评估 CCD 器件的参数，文章提出一种基于行过扫数据校正算法。行有效像元数据与对应行垂直过扫数据同时输出，通过有效像元数据减去垂直过扫数据均值，对图像数据漂移的现象进行抑制。测试电路中模拟模块与数字模块同时作用于单行有效像元数据与垂直过扫数据，通过有效像元数据减去垂直过扫数据均值，消除测试电路引入的噪声。实验结果表明，经过该算法校正后的器件读出噪声减小了 20%，暗场差值图像中超过 15 e^- 和 25 e^- 的比例减小了 25%。该算法适用于大面阵 CCD 器件，可校正测试系统引入的测试误差，提高全帧转移大面阵 CCD 器件测试效率。

关键词： 大面阵电荷耦合器件；图像漂移；行过扫数据；降噪
中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0206－05

Algorithms to Reduce Noise in CCD Using Line Overscan Data

MA Yuanyuan, LI Yandong, TANG Zunlie, LI Jin, ZHANG Na, LING Maozhen, HE Bin
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: This paper presents a correction algorithm based on line overscan data to solve the testing error produced by drifting image data in a full-frame transfer large-array charge-coupled device (CCD) and the noise introduced by the testing circuit, which prevent the accurate evaluation of the parameters of a CCD device. The effective image data and vertical overscan data were output simultaneously. The drifting image data were suppressed by subtracting the mean value of the vertical overscan data from the image data. In the testing circuit, the analog and digital modules simultaneously acted on a single line of the image data and vertical overscan data. The noise introduced by the testing circuit was eliminated by subtracting the mean value of the vertical overscan data from the image data. Experimental results showed that the proposed algorithm reduced the readout noise of the device by 20%. The ratio for values greater than 15 e^- and 25 e^- in a dark difference image was reduced by 25%. The algorithm is suitable for a large-area-array CCD device and can correct the errors introduced by the testing circuit to improve the testing efficiency of a full-frame transfer large-area-array CCD device.

Key words: CCD; drifting image data; overscan data; de-noise

0　引言

全帧转移大面阵电荷耦合器件(CCD)是巡天望远镜光学设施的关键部件。巡天望远镜在南极 Dome A[1]观测台和云南丽江观测站[2]等地面观测平台对地球进行大规模深度实时监测，建立宇宙模型对暗物质进行深入研究。巡天望远镜在距离地球表面上百千米的轨道进行天文观测任务，太空中没

收稿日期：2023－12－17.
* **通信作者：**马媛媛

有大气折射、散射等背景光的影响，能够更精确、更详细地监测和记录天文现象[3]，以帮助人类了解宇宙的起源。为深入研究宇宙历史，探索宇宙中的科学问题，国外相继发射了哈勃空间望远镜和詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)。国内，由中国科学院国家天文台主导的载人航天工程巡天空间望远镜(CSST)也在筹备中[4]。

全帧转移大面阵电荷耦合器件作为巡天空间望远镜关键部件，其单帧图像数据采集时间为 40 s。大面阵 CCD 器件在连读多帧图像数据采集时，当器件长时间工作后，器件受温度影响明显，图像数据将随时间发生漂移。图像数据漂移导致器件读出噪声增大，同时导致暗场差值图像中超过 15 e^- 和 25 e^- 的统计结果增大，测试电路引入的图像噪声也导致器件读出噪声增大。针对模拟电路和数字电路引入的图像噪声，李明等[5-6]提出了适用于椒盐与高斯混合噪声的自适应滤波算法和应用于图像传感器的联合降噪插值算法，对图像噪声进行降噪处理。Panetta 等[7]提出了基于序列到序列相似性(SSS)滤波算法对图像进行降噪处理。自适应滤波算法在最小领域空间对混合噪声处理效果较好，联合降噪插值算法适用于 CMOS 图像传感器，SSS 滤波算法依赖图像中边缘信息降低图像噪声。但针对全帧转移大面阵 CCD 器件的图像数据，上述图像降噪算法并不适用。

巡天空间望远镜主焦面探测器的读出噪声要求小于 5 e^-，无论是模拟电路和数字电路引入的噪声还是图像数据随时间漂移导致的器件读出噪声增大，都将影响器件的正确评估和筛选。本文提出一种基于行过扫数据对模拟电路和数字电路引入的噪声进行降噪处理，同时抑制大面阵 CCD 图像数据漂移，降低器件读出噪声，改善器件暗场差值图像中超过 15 e^- 和 25 e^- 的统计结果。

1　全帧转移大面阵电荷耦合器件及测试系统架构

全帧转移大面阵 CCD 器件暗场图像测试系统如图 1，CCD 器件装入杜瓦中，温控仪中测温电阻装贴在碳化硅管壳上对器件进行温度监测，杜瓦光窗用挡板挡光，温控仪和计算机放置在暗箱外。器件在杜瓦中加液氮制冷，温控仪对 CCD 器件温度进行实时监测，测试电路控制加热二极管对器件进行加热，将器件温度稳定在－85 ℃，测试电路对 CCD 器件进行连续多帧暗场图像采集[8]。

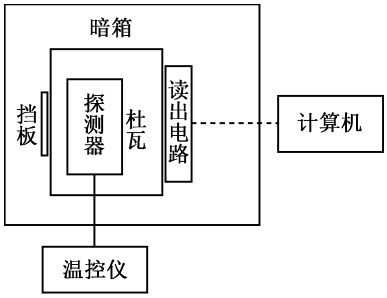


图 1　大面阵 CCD 暗场图像测试系统架构

全帧转移大面阵 CCD 器件规模为 10 k×10 k，测试电路将器件物理有效像元与过扫区像元组成 5 k×2 k 单通道数据，并拼接为 16 通道图像数据同时输出，如图 2 所示为器件 16 通道图像数据。

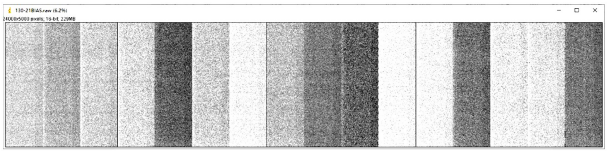


图 2　器件 16 通道图像数据

大面阵 CCD 器件在暗场图像测试系统中进行多帧图像数据采集时，因测试系统温控仪中的测温电阻无法装贴在器件芯片上，无法对器件芯片进行温度控制。大面阵 CCD 器件受温度影响明显，当器件长时间工作后，图像数据将随时间漂移。器件读出噪声和暗场差值图像中超过 15 e^- 和 25 e^- 的结果是依据多帧图像数据叠加计算标准偏差和统计的结果[9]，图像数据漂移现象将导致器件读出噪声和统计结果增大。测试电路中模拟模块与数字模块引入的图像噪声，同样会增大 CCD 器件读出噪声。图像数据漂移和测试电路引入的噪声都无法准确评估 CCD 器件状态，如何消除图像数据漂移和测试电路引入的噪声是目前大面阵 CCD 测试环节亟需解决的问题。

2　数据处理算法

2.1　器件有效像元区与垂直过扫区数据构成

器件有效像元数据是经过器件水平移位寄存器和放大器输出的数据，与器件物理像元一一对应。有效像元数据包含器件物理像元接收到的光电数据、测试电路给予的已知固定信号数据、器件工作期间物理像元产生的噪声数据以及测试电路引入的噪声数据[10]。垂直过扫区数据是由测试电路时序控

制与器件有效像元一起输出的数据，没有器件物理像元与之对应，其输出只包含测试电路引入的噪声和测试电路给予的已知固定信号数据。图 3 显示了器件有效像元数据构成以及垂直过扫区数据构成。

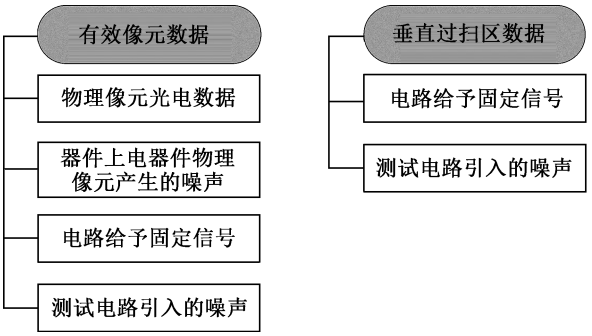


图 3 器件有效像元数据(左)及垂直过扫区数据(右)构成

2.2 器件有效像元区与垂直过扫区数据的漂移变化趋势

器件在暗场图像测试系统中制冷至－85 ℃，连续采集 30 帧图像数据。图 4，5，6 分别展示了通道 1，10，14 有效像元区响应均值及其变化趋势。其中，30 帧图像数据中通道 1，10，14 有效像元区响应绝对差值分别为 9.7，5.7 和 7.6 DN[11]。

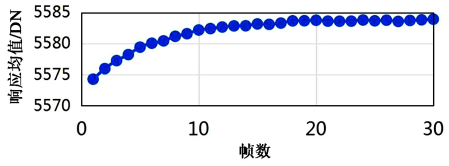


图 4 通道 1 有效像元区响应均值 30 帧变化趋势

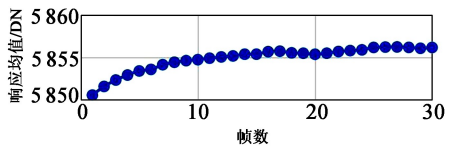


图 5 通道 10 有效像元区响应均值 30 帧变化趋势

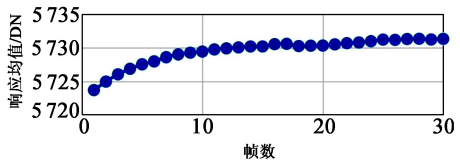


图 6 通道 14 有效像元区响应均值 30 帧变化趋势

图 7，8，9 分别展示了通道 1，10，14 有效像元区对应的垂直过扫区响应均值及变化趋势。通道 1，10 和 14 垂直过扫区响应绝对差值分别为 10.6，6.6 和 8.5 DN。

通过对比器件有效像元响应均值与对应垂直过扫区响应均值变化趋势，可知大面阵 CCD 器件受温度影响，有效像元响应与对应垂直过扫区响应变化趋势一致，且对应有效像元区与垂直过扫区响应绝对差值大致相同。综上所述，可通过有效像元数据减去垂直过扫区数据来对图像数据进行校正，消除温度导致的器件图像数据随时间漂移的现象。

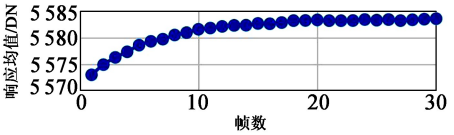


图 7 通道 1 垂直过扫区响应均值 30 帧变化趋势

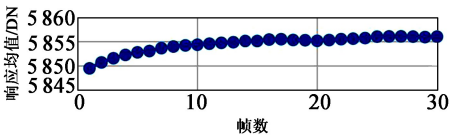


图 8 通道 10 垂直过扫区响应均值 30 帧变化趋势

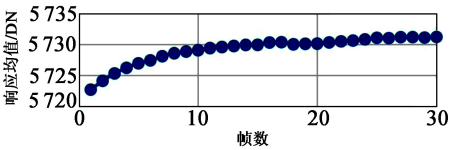


图 9 通道 14 垂直过扫区响应均值 30 帧变化趋势

2.3 垂直过扫区行数据校正算法

全帧转移大面阵 CCD 器件的规模大、行数多，其单帧的图像数据采集时间为 40 s，因采集时间长，连续多帧采集的图像数据将随时间发生漂移。测试电路将单通道单行有效像元数据与对应行垂直过扫数据按行同时输出，单通道单行数据输出时间为 0.5 ms，因输出时间短，受温度影响较小，故该单通道单行数据不随时间漂移。可通过行有效像元数据减去对应行垂直过扫数据来消除图像数据漂移。有效像元数据与对应行垂直过扫数据按行同时输出，测试电路中模拟模块和数字模块引入的噪声将同时作用在同一行有效像元数据与对应行垂直过扫数据上，可通过行有效像元数据减去对应行垂直过扫数据，以达到消除测试电路中模拟与数字模块引入的噪声的目的。

垂直过扫区行数据校正算法表示为：

$$P_{co}(i,j)=P_{orig}(i,j)-\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}P_{osc}(i,j) \quad (1)$$

式中，$P_{orig}(i,j)$ 代表原始有效像元图像数据，$P_{osc}(i,j)$ 代表有效像元对应垂直过扫区图像数据，$P_{co}(i,j)$ 为算法校正后的有效像元图像数据。

在计算过程中，首先对垂直过扫区按行取平均，器件有效像元逐一减去对应垂直过扫行均值，得到校正后的图像数据，其算法流程如图 10 所示。

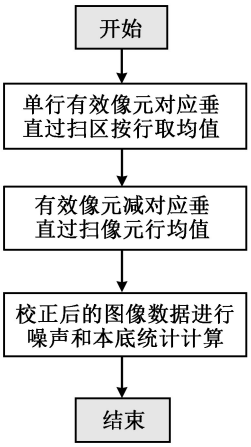


图 10　垂直过扫区行数据校正算法流程

将经过校正后的图像数据按通道分别计算各通道内像元的标准偏差，在同一通道内所有像元的标准偏差取中值后乘以该通道对应的增益[9]，即得到器件分通道的读出噪声。噪声公式可表示为：

$$P_n(i,j)=G\times\left(\frac{1}{F-1}\sum_{f=1}^{F}\left(P_{co}(i,j)-\overline{P_{co}(i,j)}\right)\right)^{1/2} \tag{2}$$

式中，G 为增益，$P_n(i,j)$ 为 (i,j) 处像元噪声，$P_{co}(i,j)$ 为算法校正后的图像数据，$\overline{P_{co}(i,j)}$ 为 (i,j) 处像元 F 帧均值。

将各单通道经过校正后的图像数据乘以各通道增益，再拼接成完整的单帧图像数据。将经过垂直过扫区校正后的 30 帧图像数据取平均作为器件主图像数据，任意选取其中一帧图像数据减去主图像数据，得到差值图像数据。其差值图像数据公式为：

$$P_e(i,j)=G\times\left(P_f(i,j)-\frac{1}{F}\sum_{f=1}^{F}P_f(i,j)\right) \tag{3}$$

式中，$P_e(i,j)$ 代表单位是 e^- 的 (i,j) 处像元数据，$P_f(i,j)$ 代表第 f 帧校正后数据。在差值图像数据中统计大于 15 e^- 和 25 e^- 的像元比例，作为 f 帧图像本底统计结果，取 30 帧本底统计结果中值作为最终本底统计结果。

3　实验结果与分析

本文利用器件在暗场图像测试系统中制冷至 −85 ℃，连续采集 30 帧图像数据进行算法验证。表 1 是器件通道 1，10 和 14 的有效像元区未作算法校正和经过算法校正后的 CCD 器件读出噪声结果。

表 1　编号 01 器件读出噪声　　e^-/pix

通道	未作算法校正读出噪声	经过算法校正后读出噪声
1	8.13	4.35
10	6.17	4.87
14	7.17	4.84

图 11 为器件通道 1，10 和 14 的有效像元区未作算法校正和经过算法校正后的 CCD 器件读出噪声曲线。从表 1 和图 11 可知校正后噪声均低于 5 e^-，器件噪声得到了明显的改善。

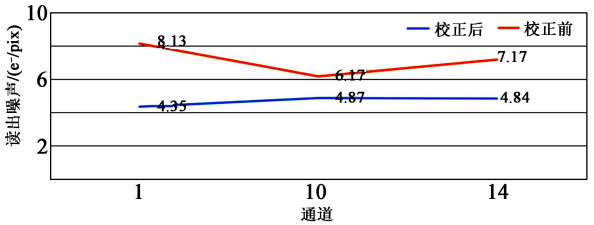


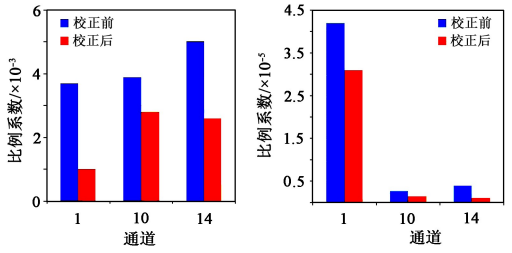
图 11　编号 01 器件读出噪声算法校正前后对比

表 2 是器件通道 1，10 和 14 的有效像元区未作算法校正和经过算法校正后的 CCD 器件本底统计结果。

表 2　编号 01 器件本底统计

通道	未作算法校正本底统计		经过算法校正本底统计	
	超过 15 e^- 比例	超过 25 e^- 比例	超过 15 e^- 比例	超过 25 e^- 比例
1	0.003 7	4.2×10^{-5}	0.001 0	3.1×10^{-5}
10	0.003 9	2.7×10^{-6}	0.002 8	1.5×10^{-6}
14	0.005 0	4.0×10^{-6}	0.002 6	1.1×10^{-6}

通过图 12(a)中校正前后本底超过 15 e^- 统计比例柱状图可看出，校正算法对图像中超过 15 e^- 统计比例有明显改善。由图 12(b)中校正前后本底超过 25 e^- 统计比例柱状图可知，校正算法对图像中超过 25 e^- 统计比例也有一定的改善。



(a) 超过 15 e^- 比例　　(b) 超过 25 e^- 比例

图 12　编号 01 器件本底统计结果算法校正前后对比

从表 1 可知经过算法校正后的图像噪声数据不超过 5 e^-，满足巡天望远镜主焦面探测器对读出噪声的要求。从表 2 可知经过算法校正的本底统计结果都优于未经算法校正后的本底结果。表 3 为编号 01 器件噪声和本底统计结果优化百分比。

对比噪声和本底统计结果可知，经过算法校正

后的图像数据，噪声结果从大于 5 e^- 到满足指标小于 5 e^-，噪声结果优化百分比达到 20%以上，本底统计结果优化百分比均达到 25%以上。经本文算法校正后，大面阵 CCD 器件的噪声和本底统计结果均得到了明显改善。

表 3 编号 01 器件噪声和本底结果优化百分比

通道	噪声结果优化百分比/%	超过 15 e^- 比例结果优化百分比/%	超过 25 e^- 比例结果优化百分比/%
1	46.5	73.0	26.2
10	21.1	28.2	44.4
14	32.5	48.0	72.5

4 结论

针对全帧转移大面阵 CCD 多帧图像数据随时间漂移的现象和测试电路引入的噪声，导致无法准确评估 CCD 器件的参数，本文提出一种基于行过扫数据校正算法。该算法利用垂直区行数据与对应行有效像元数据同时输出的特点，用有效像元数据减去对应行过扫数据，以达到抑制图像数据漂移的目的。利用行过扫数据与对应行有效像元数据输出时间不超过 0.5 ms 且两组数据经过相同测试电路的特点，将有效像元数据减去对应行过扫数据，以消除测试电路中模拟模块和数字模块引入的图像噪声，从而提高图像质量，降低噪声。该算法在全帧转移大面阵 CCD 器件的不同批次进行验证，实验数据表明器件读出噪声减少了 20%，暗场差值图像中超过 15 e^- 和 25 e^- 像元数量减少了 25%，噪声与本底统计结果均得到了明显改善。该算法简单易运行，可应用于大面阵 CCD 暗场图像测试系统中，校正测试系统引入的测试误差，提高全帧转移大面阵 CCD 器件的测试效率，对于准确、快速评估大面阵 CCD 器件具有非常重要的应用价值。

参考文献：

[1] 卢海平，袁祥岩，张凯元. 南极红外巡天望远镜红外背景辐射抑制方法[J]. 光学学报，2014，34(11)：283-287.
Lu Haiping, Yuan Xiangyan, Zhang Kaiyuan. Infrared background radiation removing design and simulation of antarctic survey telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 283-287.

[2] 雷 磊，李晋达，吴金泰，等. 云南大学多通道测光巡天望远镜 W 巡天曝光时间优化[J]. 天文研究与技术，2021，18(1)：115-121.
Lei Lei, Li Jinda, Wu Jintai, et al. On the exposure time of the mephisto-W survey[J]. Astronomical Research & Technol., 2021, 18(1): 115-121.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 李 明，李梦萄，邓光平，等. 基于 CMOS 图像传感器混合噪声的自适应滤波算法[J]. 半导体光电，2016，37(4)：568-572.
Li Ming, Li Mengtao, Deng Guangping, et al. Research on the adaptive filter algorithm based on the mixed noises of CMOS image sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(4): 568-572.

[6] 李 明，李梦萄，刘昌举，等. 应用于 CMOS 图像传感器的联合降噪插值算法研究[J]. 半导体光电，2015，36(6)：1006-1009，1013.
Li Ming, Li Mengtao, Liu Changju, et al. Research on the interpolation and noise reduction algorithms in CMOS image sensors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(6): 1006-1009, 1013.

[7] Panetta K, Bao L, Agaian S. Sequence-to-sequence similarity-based filter for image denoising[J]. IEEE Sensors J., 2016, 16(11): 4380-4388.

[8] Janesick J. Charge Collection in Scientific Charge Coupled Devices[M]. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2001: 273-278.

[9] Yao P P, Tu B H, Xu S L, et al. Electro-optical performance characterization of charge coupled device for directional polarimetric camera[J]. Results in Optics, 2021, 3: 100055.

[10] 王 颖，李 金，刘昌举. 多通道扫描 CCD 相机的低噪声设计[J]. 半导体光电，2009，30(5)：785-787.
Wang Ying, Li Jin, Liu Changju. Low noise design of multi-channel scanning CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(5): 785-787.

[11] Janesick J. Photon Transfer Curve[M]. Bellingham, WA, USA: SPIE Press, 2007: 49-71.

作者简介：

马媛媛(1992—)，女，工程师，主要从事 CCD 器件测试技术开发。