

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0126-05

一种改进的时延积分模式行间转移 CCD 相机 辐射定标方法

武星星 刘金国 周怀得 王灵杰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为了在低照度下获得高的灵敏度和空间分辨率, 行间转移 CCD 相机能够按一定的方法以时延积分(TDI)方式工作。辐射定标实验中发现, 这种工作方式会造成某些像元的输出明显低于其他像元, 从而导致系统像元响应不均匀性和信噪比变差。提出了一种改进的 TDI 模式行间转移 CCD 相机辐射定标方法。该方法将 TDI 级数作为变量加入到像元响应不均匀性和信噪比的算法中, 在基本不影响正常使用的前提下大幅提高系统的性能。验证实验结果表明, 和原方法相比, 改进后的辐射定标方法能够有效降低系统的响应不均匀性并提高信噪比, 更加真实地反映系统特性。当采用 32 级 TDI 方式时, 像元响应非均匀性从 4.88% 降低至 0.86%, 而信噪比提高了 2.9%。

关键词 成像系统; 辐射定标; 行间转移 CCD; 时延积分; 信噪比; 响应不均匀性

中图分类号 TN752 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0126

An Improved Radiometric Calibration Method of Interline Transfer CCD Camera Based on Time Delay and Integration Working Mode

Wu Xingxing Liu Jinguo Zhou Huaide Wang Lingjie

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract In order to obtain higher responsivity and spatial resolution under poor illumination condition, interline transfer CCD camera can be designed to work in time delay and integration (TDI) mode similar to TDI CCD. Whereas it is found that outputs of some pixels are obviously lower than others' as interline transfer CCD camera works in TDI mode in laboratory radiometric calibration experiments. In result, photo response non-uniformity (PRNU) and signal noise ratio (SNR) of the system become worse. An improved radiometric calibration method of interline transfer CCD camera based on TDI working mode is put forward. In this method, TDI stage is taken into account in PRNU and SNR algorithms and system performance is improved remarkably with few influences on use. Results of validation experiments prove that the improved radiometric calibration method can efficiently improve SNR and lower PRNU of the system. In addition, characteristic of the system can be reflected better with the improved radiometric calibration method. As working in 32 TDI stages, PRNU is reduced from 4.88% to 0.86% and SNR is improved about 2.9%.

Key words imaging systems; radiometric calibration; interline transfer CCD; time delay and integration; signal noise ratio; photo response non-uniformity

1 引 言

时延积分(TDI) CCD 比普通线阵 CCD 具有更高的灵敏度, 可以减小光学系统的相对孔径从而减小空间相机的体积和重量^[1,2]。行间转移面阵 CCD

能采取类似 TDI CCD 的原理工作在 TDI 模式下, 从而在低照度下获得高的灵敏度和空间分辨率^[3]。然而在实验室辐射定标中发现, 当行间转移面阵 CCD 相机工作在 TDI 方式时, 某些像元的输出明显

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-04

基金项目: 国家 863 计划(2008AA121803)资助课题。

作者简介: 武星星(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事空间光电技术及智能控制等方面的研究。

E-mail: starglare@126.com

低于其他像元,从而导致系统像元响应不均匀性和信噪比变差。本文对造成这一现象的机理进行分析,并在此基础上提出了一种改进的 TDI 模式行间转移 CCD 相机辐射定标方法,采用改进后的方法可以有效降低系统的响应不均匀性并提高信噪比。在验证实验中将改进前后的方法分别应用于以 KAI-0340s 为探测器的某空间相机的辐射定标,并对结果进行了分析比较。

2 行间转移 CCD 相机 TDI 工作模式分析

通常面阵 CCD 可以分为全帧转移 CCD,帧转移 CCD 和行间转移 CCD 三类。全帧转移 CCD 的优点是结构简单,填充因子大,但需要外接机械快门来克服图像模糊现象。帧转移 CCD 填充因子大,不需要机械快门,速度比较快。行间转移 CCD 不需要机械快门,速度最快,从而可以实现最高的帧频,缺点是填充因子小,灵敏度低^[4~8]。图 1 是行间转移 CCD KAI-0340s 的结构原理图。在每一列光敏元旁边都有一列垂直 CCD 移位寄存器 (Vertical CCD shift register, VCCD),在最下方有一行水平 CCD 移位寄存器 (Horizontal CCD shift register, HCCD)。在光积分时光敏元将光(入射的光子)转换为电子并以电荷包的形式存储。当光积分结束后电荷包从光敏元转移到 VCCD,然后开始下一帧的光积分。在对下一帧光积分的同时上一帧的电荷包从 VCCD 转移到 HCCD,再由 HCCD 水平转移后顺次读出。KAI-0340s 由 480 行 640 列有效像元组成。

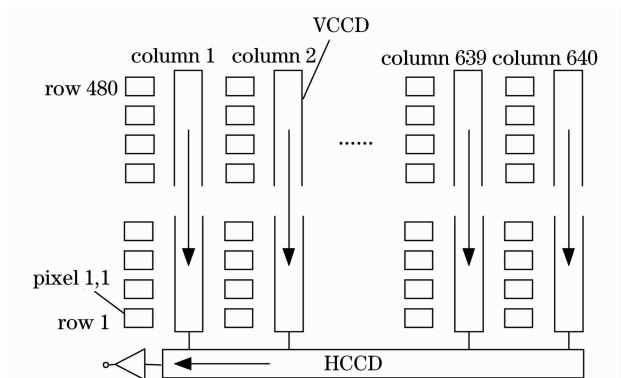


图 1 行间转移 CCD KAI-0340s 结构原理图

Fig. 1 Structure of interline transfer CCD KAI-0340s

以上是行间转移 CCD 的正常工作模式,由于空间相机经常以沿轨推扫的方式成像,行间转移 CCD 空间相机可以采取类似 TDI CCD 的原理工作在 TDI 模式下,从而提高灵敏度,在微光条件下也能得

到满意的成像效果。当工作在正常光照条件下时可以减小光学系统的相对孔径从而实现空间相机的轻量化。TDI CCD 的级数在制造时已经固定,只能以固定的几个等级工作,而和 TDI CCD 不同的是行间转移 CCD 工作在 TDI 模式时级数是连续可调的,具有更大的灵活性。然而在对以 TDI 模式工作的行间转移 CCD 相机进行实验室辐射定标时发现,某些像元的输出明显低于其他像元。图 2 是实验室辐射定标时的原理图,积分球产生均匀的漫射光束^[9],并在光源控制系统的控制下模拟在轨工作条件产生不同的辐亮度。光谱辐射计测量相机入瞳处的辐亮度。相机数据采集和遥控遥测系统控制相机输出,并采集不同辐亮度下的图像以获取每个像元的灰度值。

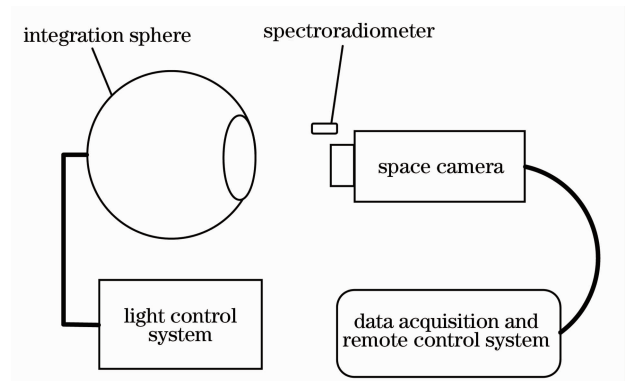


图 2 实验室辐射定标原理

Fig. 2 Sketch of laboratory radiometric calibration experiments

为了测量行间转移 CCD 相机的像元响应不均匀性 (PRNU),调节光源控制系统,使相机多数像元的输出约为饱和输出的一半,则像元响应不均匀性为^[10]

$$f_{PRNU} = \frac{1}{\bar{D}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2}{N-1}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中 \bar{D} 为所有像元灰度值的算术平均值, N 为像元总数, D_i 为第 i 个像元的灰度值(由多帧平均得出)。然而从辐射定标数据中发现,当行间转移 CCD 相机工作在 TDI 模式时,某些像元的输出明显比其他像元的输出低很多,从(1)式可以看出,这势必增大系统的像元响应不均匀性。而且从数据中看,当使用的 TDI 级数越高时,像元响应不均匀性就越严重。

行间转移 CCD 相机工作在 16 级 TDI 模式时各行列像元的灰度值如图 3 所示,从图 3 中可知接近

CCD 顶部的一些行的输出明显低于其他行,第 480 行的输出最低。在同一行各像元的输出基本相同。

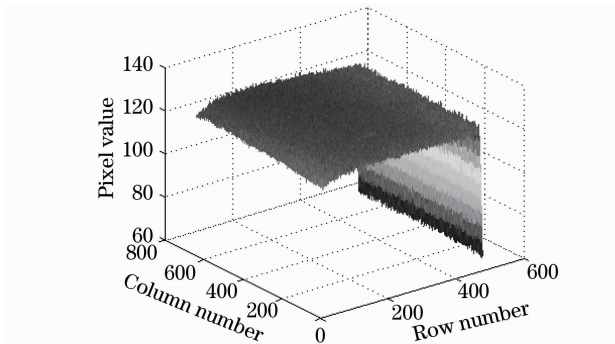


图 3 行间转移 CCD 相机工作在 16 级 TDI 模式时各像元的灰度值

Fig. 3 Pixel values of interline transfer CCD camera at 16 TDI stages

对行间转移 CCD 相机 TDI 工作模式的原理进行分析来探究这一现象的机理。当行间转移 CCD 相机工作在正常模式时,每帧光敏元只进行一次光积分。当工作在 TDI 模式时,光敏元在每一 TDI 级都进行一次光积分,如果 TDI 级数为 M ,每帧光敏元要进行 M 次光积分。图 4 为行间转移 CCD TDI 模式工作原理,图 4(a)~(c)表示在完成一级的积分后,光生电荷从光敏元转移到 VCCD,然后光生电荷在 VCCD 中向下转移一行。由于相机进行沿轨推扫,当下一级光积分开始时景物在 CCD 上成的像也移动了一个像元,因此当光积分完成时,景物 A,

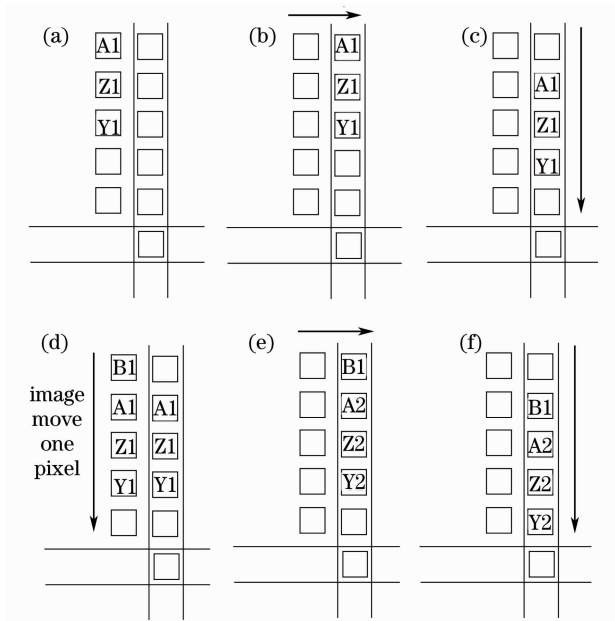


图 4 行间转移 CCD TDI 模式工作原理

Fig. 4 Principle of interline transfer CCD TDI working mode

Z 和 Y 产生的光生电荷同时存在于光敏元和相邻的 VCCD 中。当光生电荷从光敏元转移到 VCCD 后,由同一景物产生的光生电荷将进行叠加。因此 A1,Z1 和 Y1 分别变成 A2,Z2 和 Y2,但由于景物 B 第一次产生光生电荷,仍然是 B1,如图 4(d)~(f)所示。从上述分析可知,行间转移 CCD 的最上面一些行不能完成所有级数的光积分,从而导致这些行像元的输出明显低于其他行。

3 TDI 模式辐射定标方法的改进

图 5 是测量系统的像元响应不均匀性时采用不同 TDI 级数的行平均值,不同的 TDI 级数光源的辐亮度不同。从前面的分析和图 5 可知,当行间转移 CCD 相机 TDI 级数为 M 时,最上面的 $M-1$ 行不能完成所有级的光积分,输出明显低于其他行。在实际应用中这些边缘行可以补偿或剔除而对使用几乎没有影响。因此当行间转移 CCD 工作在 TDI 方式时通常的辐射定标方法不再适用,并且不能准确地反映系统的特性。这里提出了一种改进的 TDI 模式行间转移 CCD 相机辐射定标方法来解决这一问题。需要注意的是在许多 CCD 中在有效像元上还有缓冲行,这些缓冲行由于噪声的原因尽量避免使用。

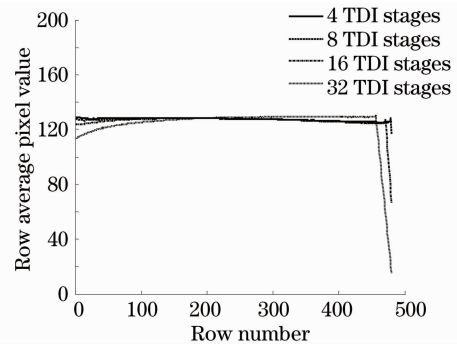


图 5 不同 TDI 级数下的行平均值

Fig. 5 Row average pixel values at different TDI stages

假设行间转移 CCD 有 C 列 R 行有效像元,TDI 级数为 M , D_{ij} 为第 i 行,第 j 列的像元的灰度值,在改进的方法中 PRNU 可计算为

$$\bar{D}_{NT} = \left(\sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^{R-M+1} D_{ij} \right) / [C \cdot (R - M + 1)], \quad (2)$$

$$f_{PRNU} = \frac{1}{\bar{D}_{NT}} \times$$

$$\sqrt{\sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^{R-M+1} (D_{ij} - \bar{D}_{NT})^2} / [C \cdot (R - M + 1) - 1] \times 100\%, \quad (3)$$

假设用 P 帧来计算信噪比(SNR, R_{SN}), D_i^k 为第 i 个像元在第 k 帧的灰度值。在改进前的方法中 SNR 计算为

$$\bar{D}_i = \left(\sum_{k=1}^P D_i^k \right) / P, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

$$R_{SN} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\bar{D}_i \cdot \sqrt{\frac{P-1}{\sum_{k=1}^P (D_i^k - \bar{D}_i)^2}} \right], \quad (5)$$

在改进的方法中 SNR 计算为

$$\bar{D}_{ij} = \left(\sum_{k=1}^P D_{ij}^k \right) / P, \quad (i = 1, 2, \dots, R-M+1; j = 1, 2, \dots, C) \quad (6)$$

$$R_{SN} = \frac{1}{C \cdot (R-M+1)} \times \sum_{j=1}^C \sum_{i=1}^{R-M+1} \left[\bar{D}_{ij} \cdot \sqrt{\frac{P-1}{\sum_{k=1}^P (D_{ij}^k - \bar{D}_{ij})^2}} \right], \quad (7)$$

式中 D_{ij}^k 为第 i 行、第 j 列位置的像元在第 k 帧的灰度值。从(3)式,(6)式和(7)式可知改进后的方法将 TDI 级数作为变量加入到像元响应不均匀性和信噪比的算法中来提高计算的准确性。

4 改进后方法的验证

为了验证改进的 TDI 模式行间转移 CCD 相机辐射定标方法的有效性,将改进前后的方法分别应用于以 KAI-0340s 为探测器的某空间相机的辐射定标中。图 6 为使用改进的辐射定标方法行间转移 CCD 相机工作在 16 级 TDI 模式时各像元灰度值。从图 6 可以看出采用改进的辐射定标方法去除了异常数据后各像元灰度值一致性明显提高,从而可以有效降低系统的响应不均匀性并提高信噪比。

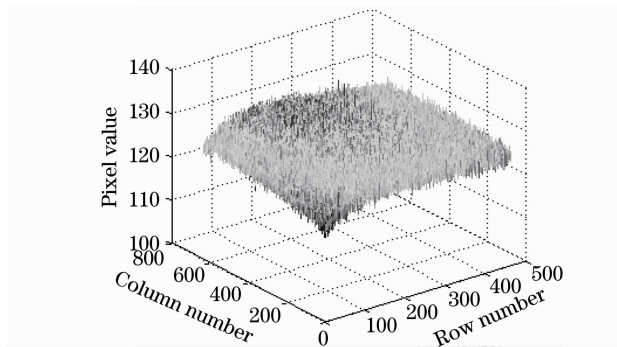


图 6 使用改进后的方法 16 级 TDI 时各像元的灰度值

Fig. 6 Pixel values at 16 TDI stages with the improved method

用改进前和改进后的方法得到的 PRNU 如表 1 所示。在不同的积分级数和光照条件下用改进

前和改进后的方法得到的 SNR 如表 2 所示。

表 1 辐射定标方法改进前后 PRNU 比较

Table 1 Comparison of PRNU obtained with original and improved method

| TDI stages | $f_{PRNU}/\%$ | |
|------------|-----------------|-----------------|
| | Original method | Improved method |
| 4 | 0.80 | 0.77 |
| 8 | 0.79 | 0.74 |
| 16 | 2.25 | 0.82 |
| 32 | 4.88 | 0.86 |

表 2 辐射定标方法改进前后 SNR 比较

Table 2 Comparison of SNR obtained with original and improved method

| Radiance [W/(m ² ·sr)] | TDI stages | SNR | |
|--------------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| | | Original method | Improved method |
| 3.49 | 4 | 67.1486 | 67.9374 |
| 2.56 | 8 | 71.4540 | 72.5907 |
| 2.56 | 16 | 94.1450 | 96.2121 |
| 0.84 | 32 | 79.6765 | 82.0065 |

从表 1 和表 2 可知,改进后的方法能够有效降低系统的像元响应不均匀性,提高系统的信噪比,在 TDI 级数高时尤其明显。在相同的光照条件下采用更高的 TDI 级数可以提高信噪比。当工作在 32 级时,采用改进后的方法像元响应非均匀性从 4.88% 降低至 0.86%,而信噪比提高了 2.9%。

5 结 论

行间转移 CCD 相机工作在 TDI 模式时部分像元输出明显变差,从而导致系统像元响应不均匀性和信噪比变差。在分析这一现象机理的基础上提出了一种改进的 TDI 模式行间转移 CCD 相机辐射定标方法。在改进后的方法中 TDI 级数作为变量加入到像元响应不均匀性和信噪比的算法中来提高准确性。以 KAI-0340s 为探测器的验证实验表明改进后的方法可以有效降低系统的响应不均匀性并提高信噪比。

参 考 文 献

- Li Yunfei, Li Minjie, Si Guoliang *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8): 1196~1202
- 李云飞, 李敏杰, 司国良 等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. *光学·精密工程*, 2007, **15**(8): 1196~1202
- Zhang Yi, Li Yingcai, Wang Hu. Analysis of the MTF of the TDI-CCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1590~1592
- 张毅, 李英才, 王虎. 航天 TDI-CCD 亚像元相机的 MTF 研

- 究[J]. 光子学报, 2005, **34**(10): 1590~1592
- 3 Zhou Huaide, Liu Haiying, Xu Dong *et al.*. The study of TDI pattern for interline transfer progressive scan CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1196~1202
周怀得, 刘海英, 徐东等. 行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式研究[J]. 光学·精密工程, 2008, **16**(9): 1196~1202
- 4 Toshi Hon. Progressive scan interline transfer CCD camera[C]. *SPIE*, 2004, **2416**: 17~29
- 5 He Guotian, Wang Xiangzhao, Tang Feng. Sinusoidal phase modulating interferometry based on low frame rate area array CCD[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 265~271
何国田, 王向朝, 唐锋. 基于低速面阵 CCD 的正弦相位调制干涉测量[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 265~271
- 6 Chen Xinhua, Zhou Jiankang, Zhou Wang. Frame transfer CCD driving circuit design for space camera[C]. *SPIE*, 2007, **6833**: 68331H
- 7 Zhou Wang. Study on enhancing dynamic range of CCD image based on digital micro-mirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 638~642
- 周望. 基于数字微镜器件技术提高面阵 CCD 相机动态范围的研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 638~642
- 8 Qian Weixian, Guan Zhiqiang, Chen Qian *et al.*. Target detection method of focal plane array search system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3066~3071
钱惟贤, 管志强, 陈钱等. 面阵扫描型警戒系统目标探测方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3066~3071
- 9 Yang Benyong, Zhang Liming, Chen Hongyao *et al.*. System design of the integrating sphere used for on-board calibration of visible-SWIR hyperspectral remote sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3545~3550
杨本永, 张黎明, 陈洪耀等. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3545~3550
- 10 Shen Xiangheng, Yang Liang, He Gengxian *et al.*. Measurement of image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric equipment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(12): 2531~2536
沈湘衡, 杨亮, 贺庚贤等. 光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测[J]. 光学·精密工程, 2008, **16**(12): 2531~2536