

改进的航空全帧型面阵 CCD 相机电子式像移补偿方法

任 航

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘 要: 目前基于 TDI 方式的电子像移补偿方法中曝光期间电荷包以行为步长进行转移,使电荷包移动和像移之间存在较大的非同步效应,降低了补偿效果。为了提高像移补偿效果,首先分析了目前基于 TDI 方式的电子像移补偿方法中电荷包移动的离散性对补偿效果的影响,提出了一种改进的电子像移补偿方法,从而可以大大减小电荷包和像移之间存在的非同步效应,对比两种方法调制度,从理论上证明了其对补偿效果的提高作用。给出了改进式的电子式像移补偿方法的驱动时序图,通过室内模拟不同像移补偿实验进行了两种方法的验证,分别比较采用两种像移补偿方法图像的清晰度。结果表明,改进式电子像移补偿法图像调制度平均值 47/96 大于传统像移补偿法图像调制度平均值 1/3,改进式像移补偿法图像清晰度平均值为 0.550 2 大于传统像移补偿法图像清晰度平均值 0.475 3。可以看出,改进式的像移补偿方法相对于传统 TDI 像移补偿方法,效果明显改善。

关键词: 全帧型面阵 CCD; 像移补偿; 驱动时序; 非同步效应

中图分类号: TN141.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1558-06

An improved electronic image motion compensation method of aerial full-frame type area array CCD camera

Ren Hang

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Currently in the electronic image motion compensation method based on TDI, charge packets were transferred to conduct step during the exposure, which made the electric pulse move and there is a large non-synchronized effect between the image motion. This reduced the compensation effect. In order to increase the compensation effect, effects of the charge packets discretion on the compensation effect in the image motion compensation method based on TDI was analyzed, and an improved electronic image motion compensation method was proposed, which reduced greatly the asynchronous effect between the electric pulse and image motion. The modulation of the two methods were compared, which theoretically proved the enhancing role of the compensation effect. The drive timing chart of the improved type of electronic image motion compensation method was advanced. The two methods were verified by imitating

收稿日期:2014-09-11; 修订日期:2014-11-15

基金项目:国家自然科学基金(11305033)

作者简介:任航(1982-),助理研究员,博士,主要从事 CCD 驱动电路设计、图像处理方面的研究。Email:renhang10@163.com

different image motion compensation experiment indoor.The image modulation mean of improved electronic image motion compensation method is 47/96, more than the traditional image motion compensation method which is 1/3. The image sharpness of improved electronic image motion compensation method which is 0.550 2, more than traditional image motion compensation method which is 0.475 3. It was shown that the improved electronic image motion compensation method is better than traditional image motion compensation method.

Key words: full-frame type area array CCD; image motion compensation; drive timing; non-synchronized effects

0 引 言

航空航天相机由于在航拍过程中飞机的高速飞行,在单位曝光时间内目标与相机存在运动,同时目标在焦平面的像也沿着航拍方向运动,产生了前向像移。其中像移补偿法分为机械式像移补偿法,光学式像移补偿法,电子式像移补偿法以及图像式像移补偿法,每种像移补偿法都有其优缺点,机械式像移补偿法和光学式像移补偿法需要复杂的机械结构和控制结构,图像式补偿法是一种后处理补偿法,实时补偿效果较差,因此经常使用电子式像移补偿法取代上述像移补偿法^[1-2]。

文中分析了目前基于 TDI 方式的电子像移补偿方法中电荷包移动的离散性对补偿效果的影响,提出了一种基于 CCD 多电极结构的补偿方法,并从理论上证明了其对补偿效果的提高作用。最后通过实验拍摄,通过对比 TDI 电子式像移补偿方法,并且给出了两种方法的图像清晰度对比,可以看出该方法明显优于 TDI 式像移补偿方法,证明了该方法的有效性。

1 电子式像移补偿法分析

1.1 TDI 电子像移补偿效果分析

图 1 是 TDI 电子像移补偿过程中 CCD 某一系列元下面电荷包的转移情况示意图,图中 CCD 的像元形状是正方形,边长为 w 。假设光子流速率为 ΔN_{∞} 、截面为像元尺寸大小的单色光在 T_0 时刻垂直照射在像元 N 上,设光束边缘离像元边缘距离为 $a(0 \leq a < w)$,如图 1(a)所示,这样光束就会在像元 N 和 $N+1$ 下的势阱中产生光电荷包 N 和 $N+1$;但是由于像移的产

生,在 T_1 时刻光束同时向右移动了一个像元大小的距离,如图 1(c)所示,直到曝光结束^[3-4]。

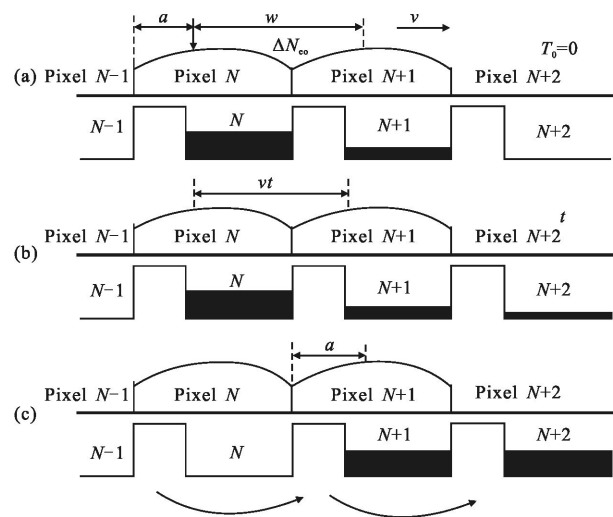


图 1 传统 CCD 电子像移补偿电荷包转移示意图

Fig.1 Schematic of traditional CCD electronic transfer of image motion compensation charge packets

利用 CCD 光电荷量定量方程 $Q_{IP} = \eta q \Delta N_{\infty} A T_c$, 其中 Q_{IP} 为产生的光电荷量, η 所用材料的量子效率; q 为电子本身的电荷量; ΔN_{∞} 为入射光子流速度; A 为光敏单元的接收光的面积; T_c 为光子的注入时间^[5]。通过计算可得该时间段内电荷包 N 收集的光电荷数:

$$Q_{IP(N)} = \frac{1}{2} \eta q \Delta N_{\infty} \frac{w}{v} (w-a)^2$$

电荷包 $N+1$ 收集的电荷数为:

$$Q_{IP(N+1)} = \frac{1}{2} \eta q \Delta N_{\infty} \frac{w}{v} (w^2 - 2a^2 + 2aw)$$

电荷包 $N+2$ 内的光电荷数为:

$$Q_{IP(N+2)} = \eta q \Delta N_{\infty} \frac{w}{v} a^2$$

每隔 w 的距离就有一个点光束对 CCD 进行照

射(空间频率为 $1/w$),则经像移补偿后相邻两电荷包的电荷量分别为 $Q_{IP(N+1)}$ 和 $Q_{IPN}+Q_{IP(N+2)}$ 所得的图像的调制度为^[5-6]:

$$M = \frac{|Q_{IP(N+1)} - (Q_{IPN} + Q_{IP(N+2)})|}{Q_{IP(N+1)} + Q_{IPN} + Q_{IP(N+2)}} = \frac{2aw - 2a^2}{w^2}$$

调制度越大,图像越容易分辨,正常人眼能够分辨的调制度最低值一般为 0.05。由式可知,传统电子像移补偿所得图像的调制度与光束的起始位置有关,当 $a=w/2$ 时, M 有最大值 0.5, 此时能较清晰地分辨单个光点;当 $a=0$ 时, M 有最小值 0, 此时则完全不能分辨单个光点。无论光束的起始位置在哪里,补偿后的图像的调制度都小于 0.5, 不利于人眼进行分辨,补偿效果不理想^[7-8]。

1.2 改进的 CCD 电子式像移补偿法分析

以 FTF5066M 为例, 一个小的像元由四个电极 P1~P4 紧密靠近组成, 按照一定的驱动时序来对 P1~P4 施加不同的高低电平, 这样势井中的电荷包就可以在 P1~P4 之间运动。其像移补偿原理如图 3 所示。设 T_0 时刻 CCD 开始曝光^[9], 单点光束在 T_0 时刻垂直照射在像元 N 上, 设光束边缘离像元边缘距离为 $a(0 \leq a < w)$, 如图 2(a)所示, 由于存在像移, 在 T_1 时刻光束向右移动一个电极宽度的距离($w/4$)^[10-11], 此时给 CCD 施加转移脉冲, 驱动像元下的电荷包同时快速向右移动一个电极, 同时使电荷包跟随像移运动, 如图 2(b)所示, 直到曝光结束。

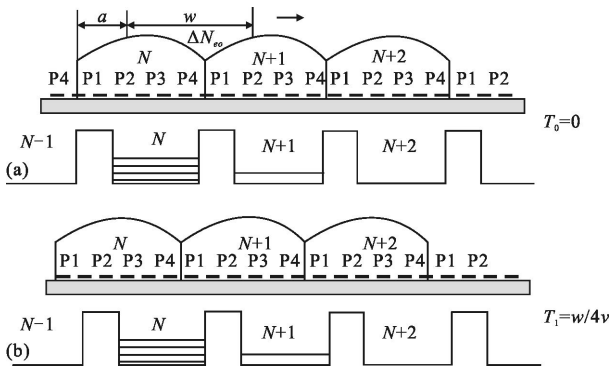


图 2 改进的 CCD 电子像移补偿电荷包转移示意图

Fig.2 Schematic of improved CCD electronic transfer of image motion compensation charge packets

当 $0 \leq a \leq 3w/4$ 时, 可得该时间段内电荷包 N 收集的光电荷数 Q_{IPN} 为:

$$Q_{IPN} = \int_0^{\frac{w}{4v}} \eta q \Delta N_{eo} w (w - a - vt) dt = \frac{1}{32} \eta q \Delta N_{eo} \frac{w^2}{v} (7w - 8a)$$

电荷包 $N+1$ 内收集的光电荷总数为^[12-13]:

$$Q_{IP(N+1)} = \int_0^{\frac{w}{4v}} \eta q \Delta N_{eo} w (a + vt) dt = \frac{1}{32} \eta q \Delta N_{eo} (w + 8a)$$

经改进方法像移补偿后所得的图像的调制度为:

$$M = \frac{|Q_{IP(N+1)}' - Q_{IPN}'|}{Q_{IP(N+1)}' + Q_{IPN}'} = \frac{|3w - 8a|}{4w} \quad (0 \leq a \leq \frac{3w}{4})$$

式中:当 $a=0$ 时, M 有最大值 $3/4$; 当 $a=3w/8$ 时, M 有最小值 0。当 $3w/4 < a < w$ 时, 光束会在电荷包 N 、 $N+1$ 和 $N+2$ 中都产生光电荷, 三个电荷包中的电荷量依次为^[14]:

$$Q_{IPN} = \int_0^{\frac{w-a}{v}} \eta q \Delta N_{eo} w (w - a - vt) dt$$

$$Q_{IP(N+1)} = \int_0^{\frac{w-a}{v}} \eta q \Delta N_{eo} w \cdot (a + vt) dt + \int_0^{\frac{4a-3w}{4v}} \eta q \Delta N_{eo} w \cdot (a + vt) dt$$

$$Q_{IP(N+2)} = \int_0^{\frac{4a-3w}{4v}} \eta q \Delta N_{eo} w \cdot vt dt$$

改进方法像移补偿后所得的图像的调制度为:

$$M = \frac{|Q_{IP(N+1)} - (Q_{IPN} + Q_{IP(N+2)})|}{Q_{IP(N+1)} + Q_{IPN} + Q_{IP(N+2)}} = \frac{|56aw - 32a^2 - 21w^2|}{4w} \quad (\frac{3w}{4} < a < w)$$

式中:当 $a=7w/8$ 时, M 有最大值 0.875。

联立就可得经改进的电子像移补偿方法补偿后图像的调制度与光束起始位置的关系方程, 其曲线如图 3 所示, 为了便于比较, 将传统补偿的调制度曲线也绘制在了该图中, 用虚线表示:

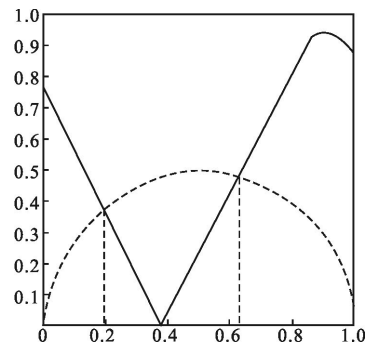


图 3 改进的电子像移补偿和传统电子像移补偿图像调制度与像点位置关系曲线

Fig.3 Image modulation and the image point position curve for improved electronic image motion compensation and conventional electronic image motion compensation

从图中可以看出, 虽然在 $0.21w < a < 0.61w$ 时, 传统补偿方法所得图像的调制度大于改进方法所得图

像的调制度,但在其它区域后者大于前者,且后者大于前者的区域要宽一些;计算可得前者的调制度平均值为 $1/3^{[15-16]}$,后者的调制度平均值为 $47/96$,后者明显高于前者。可以看出来提出的改进的电子式像移补偿方法的效果好与传统电子像移补偿方法的补偿效果。

2 驱动时序分析

在垂直拍照的面阵 CCD 航拍相机中,可以得到 CCD 焦面中心像元点的像移速率: $v=f\frac{V}{H}$,其中 f 代表相机的焦距, V 是飞机的飞行速度, H 为飞机的飞行高度^[17]。将电荷转移步长缩短为 CCD 像元电极宽度。曝光期间每隔一定时间改变一次驱动时钟,驱动电荷包沿像移方向转移一个电极,时间间隔由下式计算: $\Delta t = \frac{w}{p \cdot v}$ 其中 w 是列方向的像元尺寸,mm, v 是像面中心点像移速度,mm/s, p 是 CCD 电极相数。图 4 给出了 FTF5066M 使用改进方法进行电子像移补偿时曝光期间垂直转移时钟的时序图,A1~A4 为垂直转移驱动时钟,VAhigh 是高电平转移时钟,TG 为转移时钟^[18]。曝光期间驱动电荷包以电极宽度($w/4$)为步长进行转移,跟踪像的移动,每转移四个电极,水平转移驱动时钟驱动水平输出寄存器中的电荷进行输出,曝光结束后则按照正常的读出时序工作^[18]。

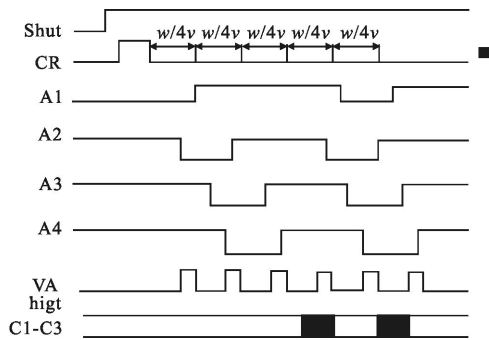


图 4 改进的基于 CCD 多级结构电子式像移补偿法曝光期间垂直转移驱动时序图

Fig.4 Improved electronic image motion compensation during exposure vertical transfer drive timing

3 改进的 CCD 电子像移补偿的成像实验

3.1 实验平台的组成结构

实验系统如图 5 所示,设转速为 V ,相机和像移

模拟装置之间的距离为 L ,则模拟像移速度计算公式为 $V_{\text{像移}} = f\frac{V}{L}$,其中 L 最短距离为 0.3m , V 最快移动速度为 50 mm/s ,完全符合文中所选择的速高比。其中相机的焦距为 90 mm ,面阵 CCD 相机像元尺寸为 $9\text{ }\mu\text{m}$ ^[19]。CCD 驱动电路和 PC 机连接,通过 RS232 接口控制来工作,图像采集卡负责采集图像,相机电路产生像移补偿时序信号,利用 VC++ 软件编写串口软件采集图像,利用 MATLAB 对图像采集的数据进行分析。



图 5 像移模拟装置图

Fig.5 Figure of image motion simulator

3.2 两种电子式像移补偿的实拍结果分析

图 6 给出了室内仿真实验的局部图片,其中图 6(a)、6(d)、6(g)为没有进行像移补偿时的局部图,模拟的像移补偿速度依次为 0.00018 m/s , 0.0009 m/s , 0.0015 m/s ,曝光时间为 10 ms ,图 6(b)、6(e)、6(h)

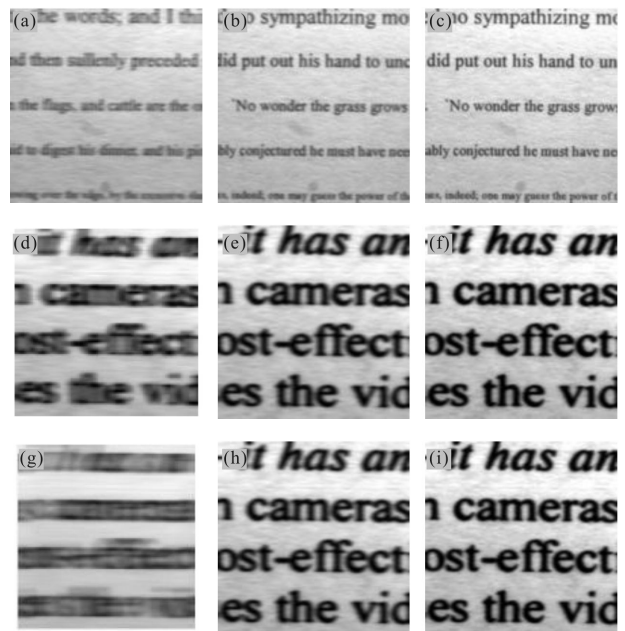


图 6 不同像移速度恢复效果图

Fig.6 Different renderings of image motion velocity recovery

是利用传统电子像移补偿方法进行像移补偿的图像,图 6(c)、6(f)、6(i)是利用改进式的电子像移补偿方法进行像移补偿后的图像。为了比较两种像移补偿方法的补偿效果,必须要对每组图像进行清晰度对比,文中采用灰度梯度和函数来对其进行清晰度评价。将所拍摄的图像灰度值进行 Matlab 分析,并且对其进行归一化处理,可以得到表 1 所得结果^[20-21]。

表 1 图像清晰度对比(灰度梯度函数值)

Tab.1 Image sharpness contrast(gray gradient function value)

Image motion speed/m·s ⁻¹	Without compensation	Traditional TDI method	New method
0.001 5	0.312 0	0.938 9	0.986 7
0.000 9	0.480 1	0.957 6	0.994 5
0.000 18	0.687 4	0.963 9	0.998 9

其中传统方法图像清晰度分别提高了 0.671 9, 0.477 5, 0.276 5, 平均值为 0.475 3, 改进式像移补偿法图像清晰度分别提高了 0.674 7, 0.514 4, 0.311 5, 平均值为 0.550 2, 从表 1 可以明显看出改进后的电子式像移补偿法补偿效果明显好于 TDI 像移补偿方法。

4 结 论

文中首先分析了传统的基于 TDI 电子像移补偿法的局限性,给出了其电荷包移动离散对补偿效果的影响,提出了一种改进的航空全帧电子式像移补偿方法,可以大大减少像和电荷包之间存在的非同步效应,并从理论上证明了其对补偿效果的提高作用,最后对改进的电子像移补偿方法进行了室内模拟像移补偿拍摄实验,取得了很好的效果。该方法可以明显减少 TDI 补偿方法电荷包与像移之间的非同步效应,从而大大提高补偿效果。最后通过实验验证,比较分别采用两种像移补偿方法图像的清晰度。结果表明,改进式电子像移补偿法图像调制度平均值 47/96 大于传统像移补偿法图像调制度 1/3,改进式像移补偿法图像清晰度平均值 0.550 2 大于传统像移补偿法图像清晰度平均值 0.475 3,可以看出该电子式像移补偿方法明显强于传统的像移补偿方法,表明该方法能取得很好的补偿效果。

参 考 文 献:

- [1] Liu Guanglin. Research on driver circuit and analog-front-end Key technology based on high frame CCD [D]. Chengdu: Institute of Photoelectric Technology, Chinese Academy of Sciences, 2008: 2-138. (in Chinese)
刘光林. 高分辨率大面阵 CCD 驱动与前端信号处理技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2008: 2-138.
- [2] Liu Guanglin, Yang Shihong, Wu Qinzhang. Design for high resolution CCD camera with high frame rate [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, 28(5): 735-738. (in Chinese)
刘光林, 杨世洪, 吴钦章. 高分辨率大面阵 CCD 相机的高帧频设计[J]. 半导体光电, 2007, 28(5): 735-738.
- [3] Liu Guanglin, Yang Shihong, Wu Qinzhang, et al. Design of high resolution camera system based on full frame CCDs[J]. *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 2007, 24(3): 320-324. (in Chinese)
刘光林, 杨世洪, 吴钦章, 等. 高分辨率全帧 CCD 相机电路系统的设计[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(3): 320-324.
- [4] Shang Xiaochuan, Zhou Hui, Zhang Xingxiang, et al. Design of FPGA-based high frame rate driving circuit for array CCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(5): 735-739. (in Chinese)
商小川, 周辉, 张星祥, 等. 基于 FPGA 的大面阵 CCD 高帧频驱动电路设计[J]. 液晶与显示, 2009, 24(5): 735-739.
- [5] Ning Yonghui, Guo Yongfei. Real-time image processing in TDICCD space mosaic camera[J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(2): 508-516. (in Chinese)
宁永慧, 郭永飞. 星上时间延迟积分 CCD 拼接相机图像的实时处理[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 508-516.
- [6] Luo Tongding, Li Bingkang, Guo Ming'an, et al. Remote image acquisition system with scientific grade CCD [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(2): 496-502. (in Chinese)
罗通顶, 李斌康, 郭明安, 等. 科学级 CCD 远程图像采集系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 496-502.
- [7] Leng Xue, Zhang Xuefei, Li Wenming, et al. Image defect of full-frame CCD in TDI mode [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(2): 467-473. (in Chinese)
冷雪, 张雪菲, 李文明, 等. 全帧 CCD 相机时间延迟积分模式下的图像缺损[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 467-473.
- [8] Zhao Huijie, Liu Xiaokang, Zhang Ying. CCD imaging

- electrical system of AOTF imaging spectrometer [J]. *Opt Precision Eng.* 2013, 21(5): 1291–1296. (in Chinese)
- 赵惠洁, 刘小康, 张颖. 声光可调谐滤波成像光谱仪的 CCD 成像电子学系统 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(5): 1291–1296.
- [9] Hu Yan, Jin Guang, Chang Lin, et al. Image motion matching calculation and imaging validation of TDI CCD camera on elliptical orbit [J]. *Opt Precision Eng.* 2014, 22(8): 508–516. (in Chinese)
- 胡燕, 金光, 常琳, 等. 椭圆轨道 TDICCD 相机像移匹配计算与成像验证[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(8): 508–516.
- [10] Ren Hang. Image motion compensation of full frame focal plane CCD camera based on FPGA [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, 32(5): 740–744. (in Chinese)
- 任航. 基于 FPGA 的面阵 CCD 航测相机像移补偿技术研究[J]. *半导体光电*, 2011, 32(5): 740–744.
- [11] Liu Yanyan, Li Guoning. Detection and record system of real time for static transfer function of the big visual field TDI CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2515–2521. (in Chinese)
- 刘妍妍, 李国宁. 大视场 TDI CCD 相机静态传递函数实时检测与记录系统 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2515–2521.
- [12] Zhang Yu, Wang Wenhua, Li Guoning, et al. Real time correction method of smear phenomenon based on interline transfer area CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2515–2521. (in Chinese)
- 张宇, 王文华, 李国宁, 等. 行间转移面阵 CCD 漏光现象的实时校正方法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2515–2521.
- [13] Liu Zexun, Quan Xianrong. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2211–2215. (in Chinese)
- 刘则洵, 全先荣. CCD 相机输出非均匀性线性校正系数的定标[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2211–2215.
- [14] Emi Miyata, Chikara Natsukari, Daisuke Akutsu, et al. Fast and flexible CCD-driver system using fast DAC and FPGA [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2001, A459: 157–164.
- [15] Ralf Kohley, Juan Manuel Martin-Fleitasa, Lluís Cavaller-Marques, et al. CCD camera and data acquisition system of scientific instrument ELMER for the GTC 10-m telescope [C]//SPIE, 2004, 5492: 475–483.
- [16] Polderdijk F. Camera Electronics for the mK xn KCCD Image Sensor Family[Z]. The Netherlands: Dalsa, 2002.
- [17] Fu Tianjiao, Zhang Liguang, Wang Wenhua, et al. Real-time processing of image restoration for space camera [J]. *Opt Precision Eng.* 2015, 23(4): 1122–1130. (in Chinese)
- 付天骄, 张立国, 王文华, 等. 空间相机图像复原的实时处理[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(4): 1122–1130.
- [18] Sun Bin, Li Jinglin, Zhang Xingxiang, et al. Interleaving assembly of TDICCDs on 600 mm focal plane [J]. *Opt Precision Eng.* 2014, 22(11): 2908–2913. (in Chinese)
- 孙斌, 李景林, 张星祥, 等. 600 mm 长焦平面时间延迟积分 CCD 的交错拼接 [J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(11): 2908–2913.
- [19] Crisp, Richard D. Back-illuminated CMOS image sensors come to the fore[J]. *Photonics Spectra*, 2010, 44(5): 103–110.
- [20] Ben-Ezra, Moshe. A digital gigapixel large-format tile-scan camera [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2011, 31(1): 49–61
- [21] Ben-Ezra, Moshe. High resolution large format tile-scan camera: Design, calibration, and extended depth of field[C]//2010 IEEE International Conference on Computational Photography, 2010: 5585095.