

文章编号 1004-924X(2018)06-1441-09

卷帘快门 sCMOS 相机对空间碎片观测的影响研究

张晓祥^{1,3*}, 赵金宇², 贾建禄², 吴庆林², 鹿 瑶^{1,4}, 高若城⁵

- (1. 中国科学院 紫金山天文台, 江苏 南京 210008;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院 空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008;
4. 中国科学院大学 北京 100049; 5. 北京师范大学附属实验中学, 北京 100032)

摘要:同每个像素曝光开始及结束时间相同的传统科学级 CCD 相机相比,近年来出现的卷帘快门(rolling shutter) sCMOS 相机工作时每个像素的曝光开始及结束时间不同,曝光时间相同,因此需要评估 sCMOS 相机像素之间曝光开始及结束时间不同对空间碎片测量精度的影响。首先测试了卷帘快门 sCMOS 相机的工作时序和最大延迟时间,并得出曝光不同步的改正公式,再以激光卫星为目标,测试了两种典型观测模式下空间碎片的天文定位精度,并对应用曝光不同步改正前后结果进行对比。测试结果表明 sCMOS 相机卷帘快门的工作时序与理论一致,边缘曝光延迟最大 10 ms;实测表明恒星位置内符合精度优于 2 arcsec,目标天文定位精度优于 3 arcsec。sCMOS 相机能够用于空间碎片观测,能够实现较高的位置测量精度。

关键词: sCMOS; 卷帘快门; 空间碎片; 天文定位;

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1441

Study on the effect of rolling shutter sCMOS camera on space debris observation

ZHANG Xiao-xiang^{1,3*}, ZHAO Jin-yu², JIA Jian-lu², WU Qing-lin², LU Yao^{1,4}, GAO Ruo-cheng⁵

- (1. Purple Mountain Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 3. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
 5. The Experimental High School Attached to Beijing Normal University, Beijing 100032, China)
- * Corresponding author, E-mail: csss@pmo.ac.cn

Abstract: Compared to traditional scientific CCD cameras in which the exposure of each pixel starts and ends synchronously, rolling shutter sCMOS cameras have recently emerged and operate based on an asynchronous start and end time, but with the same exposure period. For space debris observation,

收稿日期: 2017-10-11; 修订日期: 2017-10-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11773082, No. 11703024)

it is necessary to evaluate the effect on the measurement accuracy due to the asynchronous exposure among the sCOMS pixels. Firstly, the working sequence and max delay of certain sCMOS cameras were tested, and a correction formula was obtained. Subsequently, several laser satellites were selected as observation targets to test the astronomic positioning accuracy of space debris under two typical observation modes. The differences before and after exposure with non-synchronization correction were then compared. The experimental results indicate that the working sequence of a rolling shutter sCMOS camera is consistent with a theoretical device, and the maximum delay in the border row is 10 ms. The results also indicate that the internal accord accuracy of the staller position is better than 2 arcsec, and better than 3 arcsec for the precision of object astronomic positioning. Rolling shutter sCMOS cameras can be used for space debris observation with high-precision position measurements.

Key words: sCMOS; rolling shutter; space debris; astronomical positioning

1 引言

在空间碎片观测中,通常使用小尺寸的帧转移或行间转移读出的 CCD 用于跟踪观测,使用大尺寸的全帧读出的 CCD 用于搜索观测^[1]。随着航天发射活动及空间碎片数量的增加,对更大尺寸及更好性能 CCD 的需求越来越高,以提高暗弱空间碎片的发现能力及搜索效率^[2-5]。近年来小尺寸、量子效率高、低读出噪声、可制冷的 sCMOS 相机越来越多,但是其工作时序和传统科学级 CCD 相机工作时序不同,其每个像素的曝光开始时间不同,曝光时间相同^[6]。由于空间碎片视运动速度较快,因此 sCMOS 相机可能会因为像素间曝光开始时间不同而影响空间碎片的测量精度。

与传统 CCD 相机相比,CMOS 相机每个像元尺寸更小且既有感光器件又有电荷转换器件,因此可以实现极高帧频的读出速度和更高的空间分辨率;缺点是量子效率较低,读出噪声较大, pixel 填充率小于 100%,像素势阱较浅容易溢出,此外还有一些限制,比如面板尺寸通常较小, pixel 的均匀性不佳等^[7]。随着技术革新,CMOS 的上述缺点和限制不断弱化,出现了科学级 CMOS 相机,即 sCMOS 相机。其部分性能已经接近 CCD 相机,例如背照式 sCMOS 峰值量子效率已经可以超过 80%,靶面也可以达到 2K×2K。因此在部分科学成像领域,sCMOS 相机正在被越来越多的使用^[8-9]。

在天文观测中,CCD 相机早已被广泛应用,相比之下 sCMOS 相机使用较少。根据相机特

点,sCMOS 一般适用于对时间分辨率要求高、采用短曝光的观测项目,因此初期多应用于太阳观测,后来也用于主动光学、lucky imaging 等。近年来有光学巡天项目声称将采用 sCMOS 作为成像终端,其结果如何尚未发布^[10-12]。由于尚未大规模使用,测试天文观测中 sCMOS 性能的文章并不多,其中用于空间目标与碎片的观测更是少之又少。而空间目标与碎片观测越来越需要提高空间和时间分辨率,因此对 sCMOS 有一定需求。在此背景下,本文主要研究和分析 sCMOS 相机对空间目标与碎片的位置测量精度,以激光卫星为例。根据空间目标快速移动、测位精度对时间极其敏感的特点,本文首先测试了 sCMOS 相机 rolling shutter 模式的成像原理,并得出曝光不同步的改进公式;根据实际情况,还进行了在不同观测模式下,是否使用 BIN 模式的测试,最后统计观测目标的天文定位精度。

2 Rolling shutter 模式成像原理测试

2.1 相机技术指标和快门模式

测试使用滨松公司生产的 FLASH 4.0 sCMOS 相机,图 1 为此款相机的技术参数^[13]。

此相机在进行图像采集时快门有两种模式:rolling shutter 和 global shutter。前者每行的曝光开始时间有延迟,对快速移动物体的成像会产生图像扭曲,扭曲效果如图 2 所示^[6];后者每行同时曝光,对快速移动物体没有图像扭曲的问题,但是此模式下读出时间更长,读出噪声和暗电流噪声更大;因此在空间目标观测中常使用读出更快、读出噪声和暗电流噪声更小的 rolling shutter 模

式,因此需要对扭曲的图像进行校正,才能保证空间目标观测的定位精度。

Product number	C11440-22C (ORCA-Flash4.0)	
Imaging device	Scientific CMOS sensor FL-400	
Effective number of pixels	2048(H) × 2048(V)	
Cell size	6.5 μm × 6.5 μm	
Effective area	13.312 mm × 13.312 mm	
Full well capacity (typ.)	30 000 electrons	
Readout noise (at 100 frames/s, typ.)	1.3 electrons	
Dynamic range (typ.)	23 000:1	
Quantum efficiency	Higher than 70 % at 600 nm and 50 % at 750 nm	
Cooling method	Sensor temp.	Dark current (typ.)
Forced air (Ambient at +20 °C)	-10 °C	0.5 electrons/pixel/s
Water (+20 °C)	-20 °C	0.15 electrons/pixel/s
Water (+15 °C)	-30 °C	0.05 electrons/pixel/s
Frame rate		
Full resolution	100 frames/s	
1024 lines at center position	200 frames/s	
8 lines at center position	25 655 frames/s	
A/D conversion	16 bit output	
Readout modes	Digital binning 2 × 2 / 4 × 4	
	Sub-array readout mode	
Exposure time	9.7 μs to 10 s	
Digital interface	CameraLink full configuration Deca mode	
Lens mount	C-mount	
Power requirement	AC 100 V to AC 240 V, 50 Hz/60 Hz	
Power consumption	Approx. 90 VA	
Trigger in		
External trigger mode	Edge, Level, Synchronous readout and Start trigger	
External trigger signal routing	SMA connector or CameraLink I/F	
External trigger delay function	0 to 10 s in 10 μs steps	
Trigger out		
External signal output	3 programmable timing outputs	
External signal output routing	Global exposure timing and Trigger ready output SMA connector	

图 1 FLASH 4.0 sCMOS 相机技术参数^[13]

Fig.1 Technical parameters of FLASH 4.0 sCMOS camera^[13]

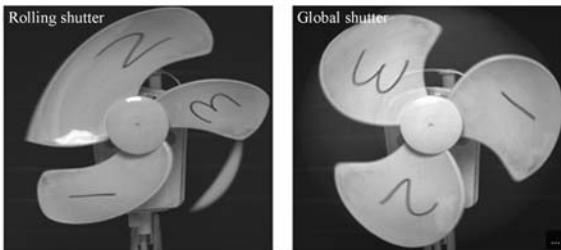


图 2 Rolling shutter 模式下图像扭曲的效果图^[6]

Fig.2 Schematic images of significant spatial distortion in rolling shutter mode^[6]

2.2 Rolling shutter 模式成像原理简介

图 3 和图 4 分别为 rolling shutter 模式曝光和读出的示意图和时序图,其成像原理可以总结为两点:(1)曝光和数据读出是从成像传感器单元的中心向两边逐行进行的;(2)每一行的曝光开始时间是不同的,但是曝光和读出的时间长度是相同的。正是由于 rolling shutter 模式有行间曝光不同步的特点,导致在此模式下对快速移动物体的成像会产生空间扭曲,具体对空间目标和碎片的观测而言,则会对目标天文定位精度产生影响。为了消除 rolling shutter 模式曝光不同步的影响,本文设计了测试试验,来验证 rolling shutter

模式实际曝光时序和理论时序是否一致,并得出曝光延迟系数用来校正扭曲的图像。

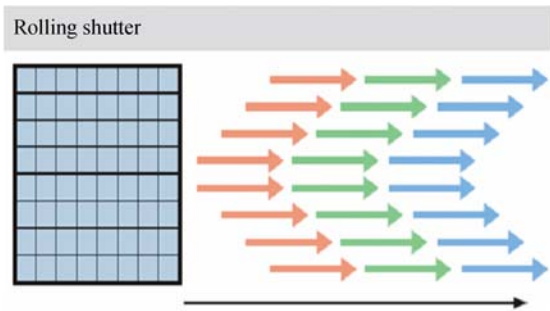


图 3 Rolling shutter 模式曝光和读出示意图

Fig.3 Diagram demonstrating the time delay between each row in rolling shutter mode

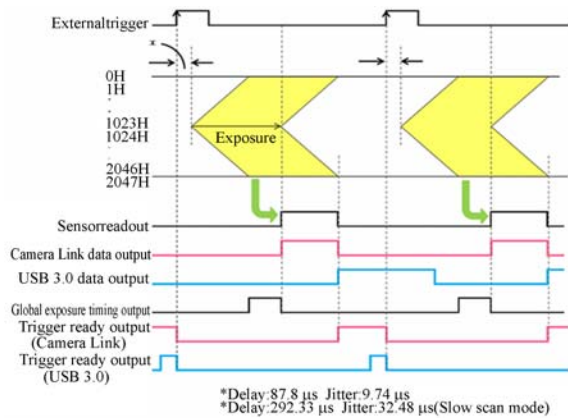


图 4 Rolling shutter 模式曝光和读出时序图

Fig.4 Timing sequence of exposure and readout in rolling shutter mode

2.3 成像原理测试内容

测试实验的设备图如图 5 所示,将 sCMOS 相机设置为外触发模式,使用同一 TTL 触发信号(5 Hz)对被测试相机和闪光灯进行同步触发,通过改变相机的曝光时间、闪光灯的持续点亮时间和延迟时间,在不同条件下对相机的成像情况进行记录,验证 sCMOS 在 rolling shutter 模式的工作时序。

2.3.1 相机与闪光灯同步工作

使用同一 TTL 触发信号对相机和闪光灯进行同步触发,让二者同时开始工作,相机曝光时间设置为 20 ms,改变闪光灯持续点亮时间记录相机成像结果,如图 6 所示。通过逐渐延长闪光灯点亮时间,相机感光区域由中心向两边扩展,结果符合上述 rolling shutter 成像原理第 1 条。



图 5 成像原理测试实验设备图

Fig. 5 Picture of devices in imaging principle test

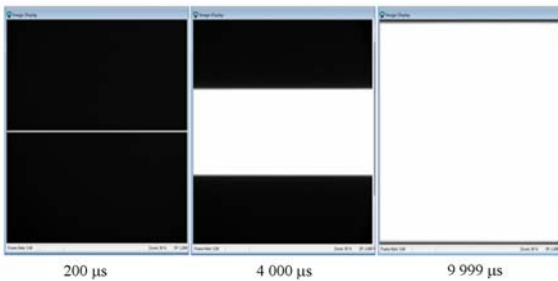


图 6 相机和闪光灯同步工作成像结果(曝光:20 ms,延迟:0 ms,闪光灯点亮时间:200/4 000/9 999 μs)

Fig. 6 Imaging results when camera synchronizing with light source(exposure time:20 ms, delay:0 ms, lighting time: 200/4 000/9 999 μs)

相机与闪光灯同步工作的时序图如图 7 所示(彩图见期刊电子版),其中黑色框表示的是闪光灯持续点亮的时间。只有闪光灯点亮且传感器相应区域开始曝光才能在对应区域成像,即图中黑色框与黄色曝光区域重合部分才会有感光成像。当闪光灯点亮时间足够长才能等到传感器两侧的成像单元开始曝光,相应区域的靶面上才会感光成像,直到闪光灯点亮时间达到 10 ms 时整个靶面才能全部成像,可知最边沿的成像单元开始曝光时刻比中心延迟约为 10 ms。

2.3.2 闪光灯延迟工作

将闪光灯持续点亮时间固定为 1 ms,相机曝光时间设置固定为 2 ms,改变闪光灯开始点亮的延时,记录相机成像结果,如图 8 所示。这种设定下的工作时序图如图 9 所示(彩图见期刊电子版),只有闪光灯点亮且相机相应区域开始曝光才

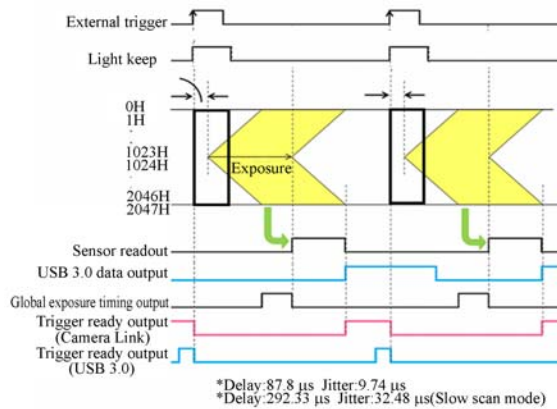


图 7 相机与闪光灯同步工作的时序图

Fig. 7 Timing sequence of exposure and readout when camera synchronizing with light source

能在对应区域成像,即图中黑色框与黄色曝光区域重合部分才会有感光成像。当闪光灯点亮延迟大于相机曝光时间时,最先曝光的中心区域已经曝光结束闪光灯仍没有点亮,因此中心区域无法感光成像。

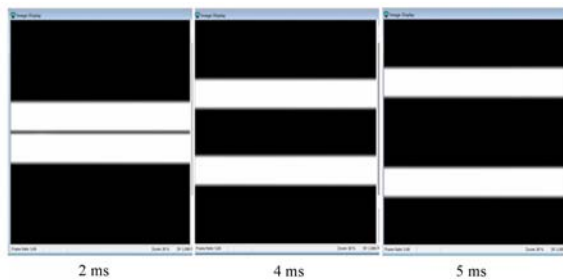


图 8 闪光灯延迟工作成像结果(曝光:2 ms,延迟:2/4/5 ms,闪光灯点亮时间:1 ms)

Fig. 8 Imaging results when light source defer work (exposure time:2 ms, delay:2/4/5 ms, lighting time: 1 ms)

将闪光灯持续点亮时间固定为 1 ms,闪光灯开始点亮的延时固定为 5 ms,改变相机曝光时间,记录相机成像结果,如图 10 所示。相应的工作时序图见图 11(彩图见期刊电子版),只有闪光灯点亮且传感器相应区域开始曝光才能在对应区域成像,即图中黑色框与黄色曝光区域重合部分才会有感光成像。因闪光灯延时固定时,只有当相机曝光时间大于闪光灯延时的条件下传感器的中心区域才能够捕捉到闪光灯。上述实验结果与 rolling shutter 成像原理第 2 条相符。

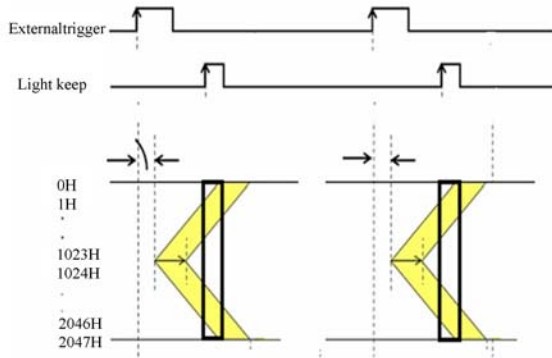


图 9 闪光灯延迟工作的时序图

Fig. 9 Timing sequence of exposure and readout when light source defer work

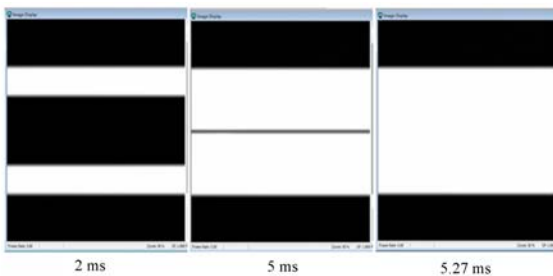


图 10 闪光灯延迟工作成像结果(曝光:2/5/5.27 ms,延迟:5 ms,闪光灯点亮时间:1 ms)

Fig. 10 Imaging results when light source defer work (exposure time:2/5/5.27 ms, delay:5 ms, lighting time:1 ms)

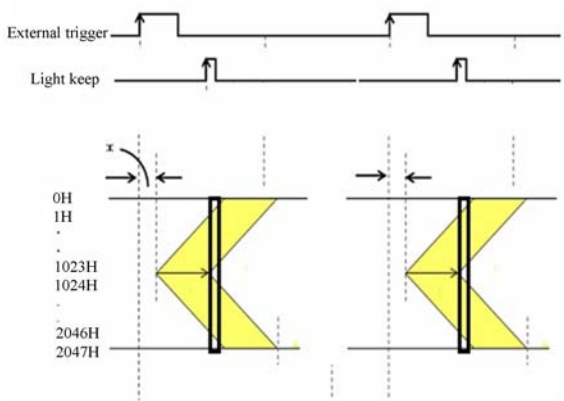


图 11 闪光灯延迟工作的时序图

Fig. 11 Timing sequence of exposure and readout when light source defer work

2.4 成像原理测试结果

通过以上实验可以看出,该款相机的成像过程完全符合 rolling shutter 成像原理,采用中心

向两边逐行曝光的模式,最边沿的延时为 10 ms,也就是说对于同一张图像,最边沿的像素比中心像素延迟 10 ms 左右成像。由此可以得出对于快速移动目标观测时间的改正公式,单位为 s:

$$\Delta t = 0.01 \times \frac{|x - 1024|}{1024} \quad (1 \times 1 \text{BIN}),$$

$$\Delta t = 0.01 \times \frac{|x - 512|}{512} \quad (2 \times 2 \text{BIN}).$$

实验中,仅对目标和定标星定心后的中心坐标使用该改正公式,由于曝光不同步在相邻几行间的影响非常小,所以省略星像定心过程中曝光不同步的改正。

3 sCMOS 相机天文定位精度测试

3.1 观测设备和观测模式

为了测试 sCMOS 相机在空间碎片观测中的定位精度,测试相机被安装在空间碎片望远镜上进行了实测。望远镜的主要参数见表 1,观测点的地理坐标为:赤经 125.4°,赤纬:43.8°。

表 1 测试所用望远镜的主要参数

Tab. 1 Telescope parameters in experiment

Parameters	Value
Diameter	15 cm
Focal length	30 cm
Pixel scale	4.475 arcsec (1×1BIN)
	8.950 arcsec (2×2BIN)

Rolling Shutter 工作时序决定了 sCMOS 相机的部分像素曝光开始和结束时间不同步,但每个像素的曝光时间相同。由于空间目标视运动较快,对时间精度更加敏感,因此为了评估 sCMOS 在 Rolling Shutter 模式下对空间目标测量精度的影响,测试选择拥有精密星历的激光测地卫星作为观测目标,使用和两种图像采集模式,并采用以下两种观测模式对激光卫星进行观测:

(1) 目标跟踪模式:激光卫星在观测视场中处于静止状态,恒星穿过观测视场;

(2) 目标穿过模式:激光卫星穿过观测视场,恒星在观测视场中处于静止状态。

3.2 观测结果

为了测试应用于空间碎片观测时的定位精度,一般选择拥有精密星历的激光卫星作为观测

目标,此次实验观测的目标为 HAIYANG 2A 卫星。在空间目标与碎片观测的资料归算中一般使用天文定位方法,根据目标相对于背景恒星的位置来计算目标在特定参考系下的坐标。实验中观测资料归算到站心 J2000 平赤道平春分点坐标系下,使用由国际激光卫星测距网给出的卫星激光测距(SLR)数据定轨得到的精密星历(精度优于米级)。实验在测试目标天文定位精度的同时还测试了背景恒星的内符合精度。此外对目标图像还作了曝光不同步改正前后的精度比较,来说明行间曝光延迟对观测精度的影响。为探究影响目标观测精度的其他因素,文中还展示了目标在 sCMOS 相机上的脱靶量以及目标星像的信噪比,以下分情况进行说明。

3.2.1 模式下天文定位精度

(1) 目标跟踪模式

目标跟踪模式下,恒星星像由于相对视运动被拉成条纹状,对定心精度有所影响。测试中由于曝光时间较短,对全图中所有匹配恒星的定位精度进行统计可以看出,恒星内符合精度在赤经方向小于 2 arcsec,在赤纬方向小于 1 arcsec,结果如图 12 和图 13 所示,此外在下文的几种观测模式下,恒星的内符合精度都普遍优于 2 arcsec,其中恒动模式下一般优于 1 arcsec,这与常用的 CCD 相机观测精度相当。

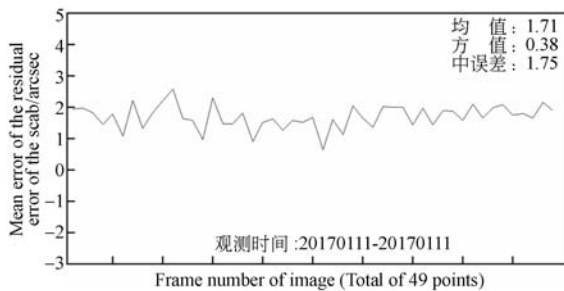


图 12 赤经方向恒星内符合精度

Fig. 12 Internal accord accuracy of staller position in RA direction

目标天文定位的精度在没有作曝光不同步改正时赤经赤纬方向均小于 2 arcsec,但是作了改正之后反而赤经方向的误差有所增大,如图 14 和图 15 所示。由于此种情况下观测样本不足,我们猜测造成误差增大的可能原因是目标星像没有锁定在视场中心附近,而视场边缘部分的畸变较为显著,可以严重降低目标的定位精度。观测目标

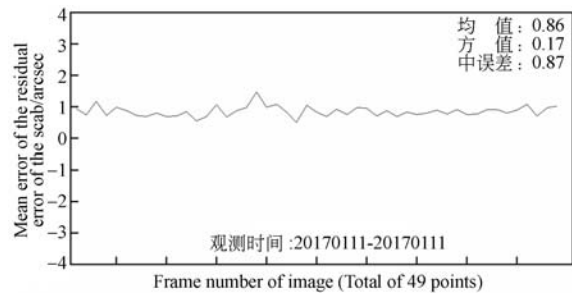


图 13 赤纬方向恒星内符合精度

Fig. 13 Internal accord accuracy of staller position in DEC direction

的脱靶量如图 16 所示,可以看出由于跟踪误差,目标落入了视场的一个角落。若畸变不显著或畸变可以被矫正,则可以验证曝光不同步改正对定位精度的提高。

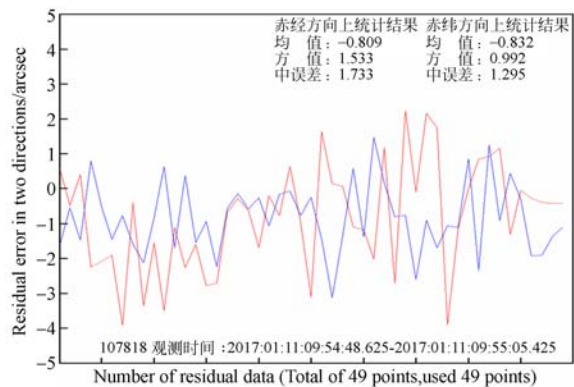


图 14 不作时间改正的目标天文定位精度

Fig. 14 Astronomic positioning precision of object without exposure non-synchronization correction

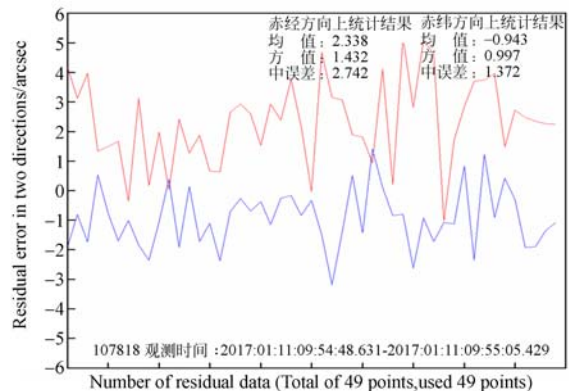


图 15 作时间改正的目标天文定位精度

Fig. 15 Astronomic positioning precision of object with exposure non-synchronization correction

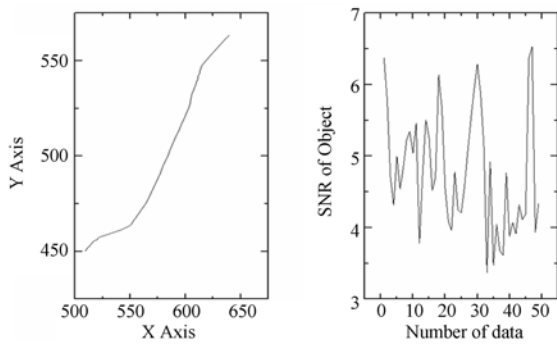


图 16 目标的脱靶量(左)和目标星像信噪比(右)

Fig. 16 Target deviations (left) and signal to noise ratio(right)

(2) 目标穿过模式

在此模式下目标天文定位精度在曝光不同步改正前后的结果如图 17 和 18 所示,改正后目标定位精度在赤经方向有较大提高,但在赤纬方向有所降低;同时改正后的残差曲线更平缓,表现为方差降低,图 18 中赤纬方向残差曲线整体偏下,这可能预示着观测资料处理过程中存在某些系统误差,使得赤纬方向的定位精度不升反降。通过检查整个观测资料处理流程,系统误差可能来源于不精确的观测点地理坐标,资料归算时带入这一系统差会对目标天文定位结果产生一定影响。

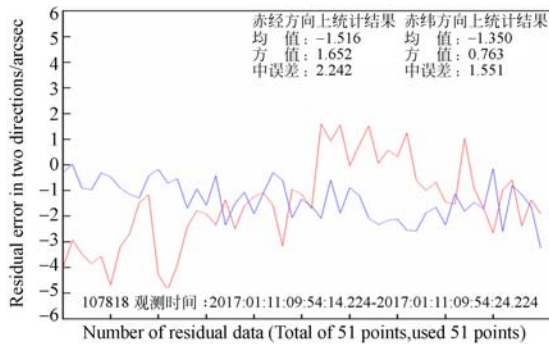


图 17 不作时间改正的目标天文定位精度

Fig. 17 Astronomic positioning precision of object without exposure non-synchronization correction

3.2.2 模式下天文定位精度

(1) 目标跟踪模式

在此模式下目标天文定位精度在曝光不同步改正前后的结果如图 19 和 20 所示,目标脱靶量和信噪比见图 21,从目标脱靶量可以看出,目标在观测弧段内基本上被锁定在视场中心附近,即 2×2 BIN 模式下的视场中心(512,512),所以根据

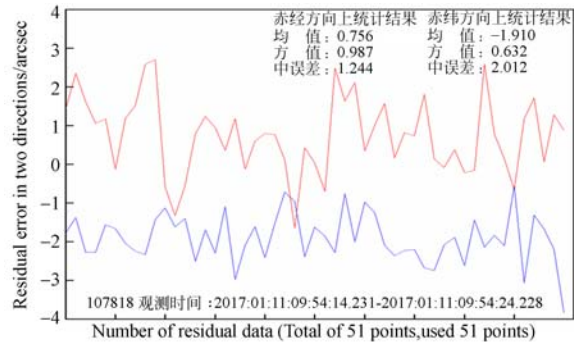


图 18 作时间改正后的目标天文定位精度

Fig. 18 Astronomic positioning precision of object with exposure non-synchronization correction

改正公式,曝光不同步产生的影响很小,表现在改正前后目标的天文定位精度变化不大。

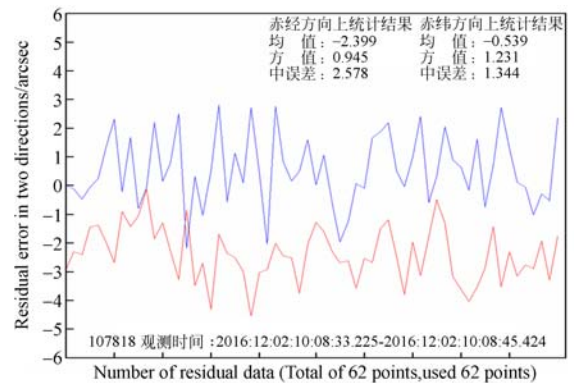


图 19 不作时间改正的目标天文定位精度

Fig. 19 Astronomic positioning precision of object without exposure non-synchronization correction

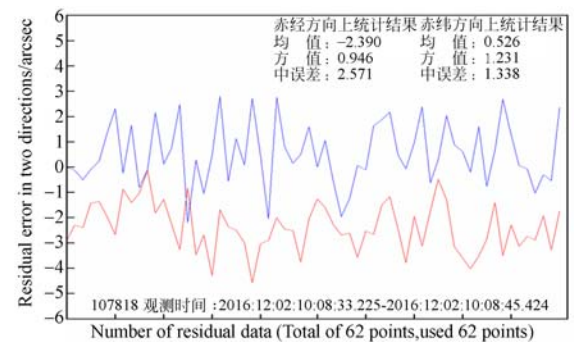


图 20 作时间改正后的目标天文定位精度

Fig. 20 Astronomic positioning precision of object with exposure non-synchronization correction

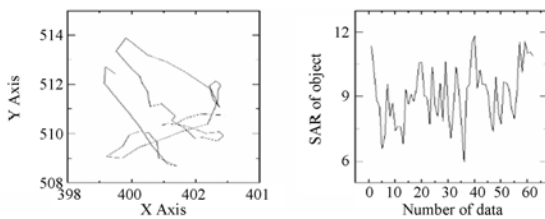


图 21 目标的脱靶量(左)和目标星像信噪比(右)
Fig. 21 Target deviations (left) and Signal to Noise Ratio(right)

(2) 目标穿过模式

在此模式下目标天文定位精度在曝光不同步改正前后的结果如图 22 和 23 所示,由于目标穿过视场时在远离视场中心的位置受曝光不同步的影响显著,可以看出经过改正后目标定位精度在两个方向上都有了较大提高,因此在目标穿过模式下,必须要做曝光不同步改正。

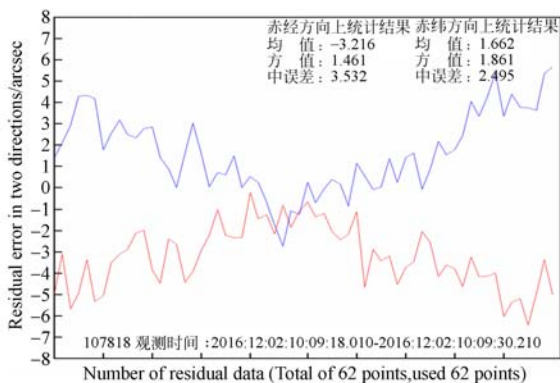


图 22 不作时间改正的目标天文定位精度
Fig. 22 Astronomic positioning precision of object without exposure non-synchronization correction

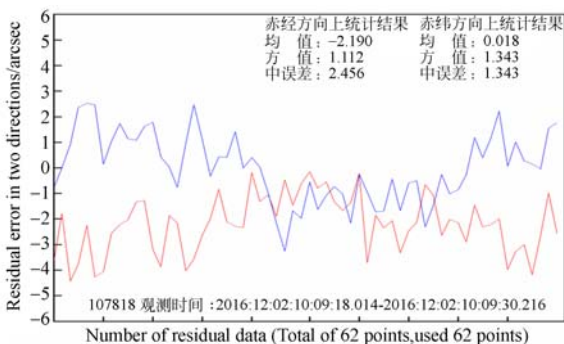


图 23 作时间改正后的目标天文定位精度
Fig. 23 Astronomic positioning precision of object with exposure non-synchronization correction

4 结 论

根据 sCMOS 相机 rolling shutter 模式成像原理测试结果,曝光不同步在靶面边缘像素的最大影响为曝光延迟 10 ms。根据目标天文定位的实测结果,总结 sCMOS 相机在空间目标与碎片观测中的应用可以得出如下结论:

(1) 无论何种观测模式,恒星天文定位内符合精度在赤经和赤纬两个方向上都优于 2 arcsec;

(2) 除 2×2 BIN 目标穿过模式外,激光卫星天文定位精度在赤经和赤纬两个方向上都优于 3 arcsec;在 2×2 BIN 目标穿过模式下,激光卫星天文定位精度在未经曝光不同步改正时在赤经方向残差大于 3 arcsec,但改正过后残差减小 1 arcsec 左右;

(3) 在目标跟踪模式下,不作曝光不同步改正与作了改正的天文定位精度相当;在目标穿过模式下,作曝光开不同步改正可以提高定位精度;

(4) 观测点坐标精度较差,可能存在一定系统差,对标校结果产生一定程度的影响。

由于 sCMOS 相机在空间目标与碎片观测中的应用还较少,相对而言缺少相关的使用经验。基于上述实测验证的初步结论,本文尝试给出以下两条建议供大家参考和讨论:

(1) 在使用 sCMOS 相机进行空间目标观测时,建议不要使用 BIN 模式。

(2) 尽管测试中观测资料稍显不足,但从激光卫星标校的统计结果可以看出:尽管 sCMOS 曝光时间不同步,但对激光卫星的测量精度影响不大;对于中高轨目标而言,时间精度要求略低,因此对其测量精度造成的影响更小。

本文测试了 rolling shutter 模式下 sCMOS 相机对空间目标的观测精度,至于 global shutter 模式,虽然存在暗电流和读出噪声较大的缺点,其在空间目标与碎片观测中的影响还需要进一步测试,这也是下一步计划测试的内容。

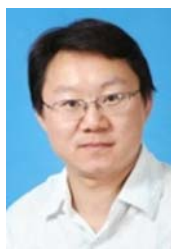
参考文献:

- [1] SCHILDKNECHT T. Optical surveys for space debris[J]. *Astron Astrophys Rev*, 2007, 14:41-111.
- [2] SCHILDKNECHT T, MUSCIA R, PLONER E, *et al.*. Optical observations of space debris in GEO and in highly-eccentric orbits [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 5(34):901-911.
- [3] LAAS B M, WAILLIEZ S, DELEFLIE F, *et al.*. First astrometric observations of space debris with the M \acute{e} O telescope [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 3(49):603-611.
- [4] PORFILIO M, PIERGENTILI F, GRAZIANI F. First optical space debris detection campaign in Italy [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 5(34):921-926.
- [5] HEBERT T J, AFRICANO J L, STANSBERY E G, *et al.*. Optical observations of the orbital debris environment at NASA [J]. *Advances in Space Research*, 2001, 9(28):1283-1290.
- [6] Rolling and Global Shutter. <http://www.andor.com/learning-academy/rolling-and-global-shutter-exposure-flexibility>, website, 2017/09/26
- [7] FOSSUM E R. CMOS image sensors: electronic camera-on-a-chip [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, 10(44):1689-1698.
- [8] BEHNKE T, KUHRT E, LICHOPOJ A, *et al.*. Imaging systems for planetary exploration [C]. *Data Systems in Aerospace*, Barcelona, Spain, 2015.
- [9] JORDEN P R, JERRAM P A, FRYER M, *et al.*. e2v CMOS and CCD sensors and systems for astronomy [J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, 7(12):C07008.
- [10] QIU P, MAO Y N, LU X M, *et al.*. Evaluation of a scientific CMOS camera for astronomical observations [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2013, 5(13):615-628.
- [11] ZIMMER P, MCGRAW J, ACKERMANN M. Affordable wide-field optical space surveillance using sCMOS and GPUs [C]. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, Hawaii, USA, 2016.
- [12] SCHILDKNECHT T, HINZE A, SCHLATTER P, *et al.*. Improved space object observation techniques using CMOS detectors [C]. *6th European Conference on Space Debris*, Darmstadt, Germany. 2013.
- [13] Digital Camera C11440-22c Instruction manual. http://www-bl20.spring8.or.jp/detectors/manual/C11440-22C_E_v.1.4.pdf, website, 2017/09/26.

作者简介:



张晓祥(1970—),男,江苏徐州人,博士,研究员,博士生导师,1995年于南京大学获得学士学位,2001年于中国科学院紫金山天文台获得硕士学位,2007年于中国科学院紫金山天文台获得博士学位,主要从事空间碎片观测、图像处理、天文导航等方面的研究。E-mail: csss@pmo. ac. cn



赵金宇(1977—),男,内蒙赤峰人,博士生导师,研究员,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事数字图像信号处理软硬件技术,图像跟踪与目标识别,图像恢复等方面的研究。E-mail: zhaojy@ciomp. ac. cn