

光学相机FOC对黑洞双星高时间分辨 测光性能研究*

毛东铭^{1,2} 余文飞^{1†} 林杰^{1,2} 张居甲³ 闫震¹ 张惠¹
张文达¹

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

摘要 黑洞暂现双星MAXI J1820+070于2018年3月的明亮爆发为研究光学快速测光能力提供了重要机遇. 以快速光学相机(Fast Optical Camera, FOC)为终端设备分别在2018年4月22日、5月26日和8月31日(UTC)使用云南天文台丽江观测站2.4 m望远镜对爆发中的黑洞双星MAXI J1820+070进行了亚秒时标的测光观测. 通过观测数据分析, 研究了相机的快速测光性能. 对全帧和1/4帧两种观测模式的帧间间隔(frame time), 测得平均帧间间隔为 (22.866 ± 0.679) ms和 (5.868 ± 0.169) ms. 通过视场中多颗明亮参考源校准, 提取了观测对象和参考源的光变曲线, 获得了光变曲线的傅里叶功率谱, 区分了观测对象本征光变和仪器或望远镜等观测因素带来的非本征光变, 成功探测到目标黑洞双星MAXI J1820+070中的光学波段低频准周期振荡信号, 并判别了观测中来自仪器设备或与观测条件相关的时变信号. 这成功验证了相机高速稳定的测光性能和对短至5 ms时标光变信号的探测能力.

关键词 恒星: 黑洞, 恒星: 变源, 技术: 测光

中图分类号: P141; 文献标识码: A

1 引言

光变是许多致密天体系统的重要性质, 时变观测是揭示各类致密天体物理性质^[1-2], 确定系统参数^[3-5], 甚至探测广义相对论效应^[6-7]等一系列天体物理问题和效应的重要手段. 20世纪以来, 随着探测技术、计算能力以及数据读写速度的发展, 高速光学测光(时间分辨率达到亚秒时标)成为研究致密天体吸积与喷流的重要手段^[8-9].

双星系统中的致密天体主要指白矮星、中子星和黑洞^[10-11]. 这些致密天体附近的动力学时标 t_{dyn} 与天体质量 M 和距离 R 有关($t_{\text{dyn}} \sim \sqrt{\frac{2R^3}{GM}}$, 其中 G 为万有引力常数), 对应范围从白矮星的秒量级到中子星和黑洞的毫秒量级. 这意味着在这些天体附近的物质

2021-01-09收到原稿, 2021-02-25收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11333005、U1838203)和国家重点研发计划(2016YFA0400804)资助

†wenfei@shao.ac.cn

(如吸积盘)运动和辐射变化可短至秒和毫秒时标,因此对于致密天体的基本性质和邻近区域的研究,高时间分辨率测光观测是十分必要的.白矮星双星系统中最具代表性的是激变变星(Cataclysmic Variable, CV). CV对于研究吸积过程的物理机制非常重要^[12-13].这类双星系统中,白矮星从伴星吸积物质产生以可见光为主的辐射^[14].在时变研究领域,人们在CV中探测到两种准周期光变现象:一种称为矮新星振荡(Dwarf Nova Oscillation, DNO)^[15],其时标范围约为8-40 s,另一种称为准周期振荡(Quasi-Periodic Oscillation, QPO)^[16-17],时标范围约为50-1000 s. Woudt和Warner在2002年发现VW Hyi同时出现DNO和QPO^[18]. Mauche在2002年也观测到SS Cyg中的QPO现象^[19].

黑洞和中子星双星的光变研究主要来自X射线观测.爆发中的黑洞X射线双星(Black Hole X-Ray Binary, BHXR)因具有较明亮的X射线辐射而成为典型的高能光变研究对象.银河系中的BHXR大部分为暂现源, BHXR在爆发过程中X射线流量可以增加5-8个量级,对其X射线光变的观测研究也最为丰富^[20-22].人们根据X射线能谱和光变观测特征,将其演化过程划分为几个不同的谱态^[22-23].在所谓硬态和硬中间态,这些BHXR的X射线辐射显示出强烈的光变,相对均方根(root-mean-square, rms)光变幅度可以高达百分之几十^[24],通常在傅里叶功率谱上观测到带限噪声(Band-Limited Noise, BLN)成分,可以叠加QPO成分^[25-26],而软态时的X射线光变相对幅度较弱,约处于1%-5%之间^[23, 27-29],其X射线功率谱由一个幂律噪声(Power-Law Noise, PLN)成分主导^[22, 30-32].过去20 yr,人们还发现BHXR中的X射线快速光变同时伴随着光学和红外波段的快速光变,而多波段同时观测发现其光学光变和X射线光变在短时标上显示出相关性.例如Kanbach等^[8]在对黑洞双星XTE J1118+480光学与X射线光变曲线间的交叉相关函数(Cross-Correlation Function, CCF)研究时发现,光学辐射相对X射线辐射存在一个30 ms的延迟,但也存在超前的成分.相似的情形也出现在其他BHXR中,比如GX 339-4^[33]和V404 Cyg^[34-35]的光学/X射线同时观测显示光学相对X射线也存在约100 ms的延迟.在GX 339-4硬态的光学光变功率谱中也观测到与X射线成分类似的BLN和QPO成分^[36-39].光学光变和X射线光变在时域/频域的相关性表明,光学快速测光观测也是探测黑洞最内吸积流和喷流性质的重要手段.

为了探测包括黑洞、中子星和白矮星致密天体中秒时标以下的快速光变,有必要通过观测研究我们于2009年启动的快速测光项目的观测设备—快速光学相机(Fast Optical Camera, FOC)的实测性能.帧间间隔关系到设备探测短时标光变信号的能力,因此我们需要研究相机在不同观测模式下的平均帧间间隔和稳定性.我们还需要找到校准相机探测天体光变幅度的方法,分析仪器或者望远镜等观测因素引起的非本征光变.这需要同时观测视场中多个明亮参考源,区分目标源的本征光变和其他非本征光变.

MAXI J1820+070是一个2018年初新发现的暂现黑洞X射线双星^[40-42],其X射线爆发于2018年3月11日,被日本X射线全天监视器(Monitor of All-sky X-ray Image, MAXI)首次发现^[43],而其光学对应体ASASSN-18ey被光学巡天项目(All-Sky Automated Survey for SuperNovae, ASAS-SN)独立发现^[44],随后得到相互证认^[45]. MAXI J1820+070坐标是赤经R.A.=18:20:21.94,赤纬Dec.=+07:11:07.19^[46],估计距离为 (2.96 ± 0.33) kpc^[47].它爆发时在X射线和光学波段都异常明亮,比如INTEGRAL (International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory)在15-50 keV能段探测到的X射线峰值流

量可以达到3.5个Crab^[48], 而光学波段的星等也达到了 $m_v = (12.05 \pm 0.04) \text{ mag}$ ^[49]. 人们通过X射线观测发现MAXI J1820+070在爆发过程中经历了硬态-软态-硬态的态跃迁^[50], 在X射线波段^[51]、光学波段^[52-54]和射电波段^[55]都表现出显著的短时标光变现象, 并且在光学^[56-59]和X射线^[48, 60-62]波段观测到低频准周期振荡, 特别指出的是, 其光学低频准周期振荡信号是由我国科研团队使用丽江2.4 m望远镜的YFOSC (Yunnan Faint-Object Spectrograph and Camera)设备首先发现的^[56]. 这是我国光学观测设备首次发现黑洞双星中的光学准周期振荡信号.

MAXI J1820+070在光学波段明亮, 又具有特殊的光变特征, 有多颗近角距离明亮参考源相伴. 因此, MAXI J1820+070的爆发给我国观测团队提供了研究黑洞短时标光学光变的机遇, 也成为我们检验FOC快速测光性能的理想对象. 本文后续内容安排如下: 我们在第2节简要介绍光学快速测光项目与FOC. 第3节简要介绍对MAXI J1820+070的光学观测; 第4节介绍观测图像预处理和孔径测光以及最佳孔径选择方法的研究; 第5节介绍光变曲线和数据分析, 分为3个内容: 平均帧间间隔与读出噪声的研究和分析, 观测目标源的光变曲线校准以及功率谱分析; 最后是总结与讨论.

2 致密天体光学快速测光与FOC相机项目简介

对黑洞暂现源MAXI J1820+070本次爆发实施的光学快速测光观测使用的设备是我们团组的FOC. FOC项目于2009年启动, 分别于2010年1月使用上海1.56 m望远镜和2012年5月使用丽江2.4 m望远镜完成露光(参见ATel 11510^[56]). 之后针对著名黑洞双星天鹅座X-1、中子星双星天蝎座X-1、X射线脉冲星仙武座X-1、蟹状星云脉冲星以及个别明亮激变变星进行了实验观测. 相关测试结果在EWASS (European Week of Astronomy and Space Science) 2015年会议中进行过介绍. 此次观测挂载在云南天文台丽江2.4 m望远镜上. 丽江观测站台址位于东经 $100^\circ 1' 48''$, 北纬 $26^\circ 41' 42''$, 海拔为3193 m^[63]. 作为中国最大的通用型光学天文望远镜, 丽江2.4 m望远镜的指向精度优于 $2''$, 闭环跟踪精度优于 $0.5''/\text{hr}$ ^[63-64].

FOC相机是剑桥大学Lucky Imaging系统的实验室定制版本. 图1显示了FOC相机的外观和安装于丽江2.4 m望远镜时的照片. 该系统利用液氮制冷, 需保证其工作温度维持在约 -120°C 附近. FOC使用电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)型号为E2 V CCD97¹, 在波长5000–6500 Å范围的量子效率大于90%. FOC的CCD是帧转移CCD (frame transfer CCD), 它在保持较高的读出速率的同时, 能将读出噪声维持在非常低的水平: 在读出速率为1 MHz时的读出噪声 $< 1 \text{ e}^- \text{ rms}$, 在最大读出速率15 MHz时的读出噪声为 $14 \text{ e}^- \text{ rms}$, 这得益于E2V Technologies制造的电子倍增CCD (Electron-Multiplying CCD, EMCCD)技术. FOC使用全帧(full-frame)观测模式, 理论上可以拥有高达约45 Hz的帧频; 当使用子帧(sub-frame)模式进行观测时, 帧频可以进一步提高. FOC的CCD的图像区域为 552×528 个像素, 有效像素为 512×512 , 像元大小为 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$, 有效显示区域大小为 $8.19 \times 8.19 \text{ mm}$, FOC放置于丽江2.4 m望远镜焦平面, 对应的视场(Field of View, FoV)约为 $91'' \times 91''$.

¹详见http://www.pixcellent.com/ccd97-00_b_2p_imo.pdf.

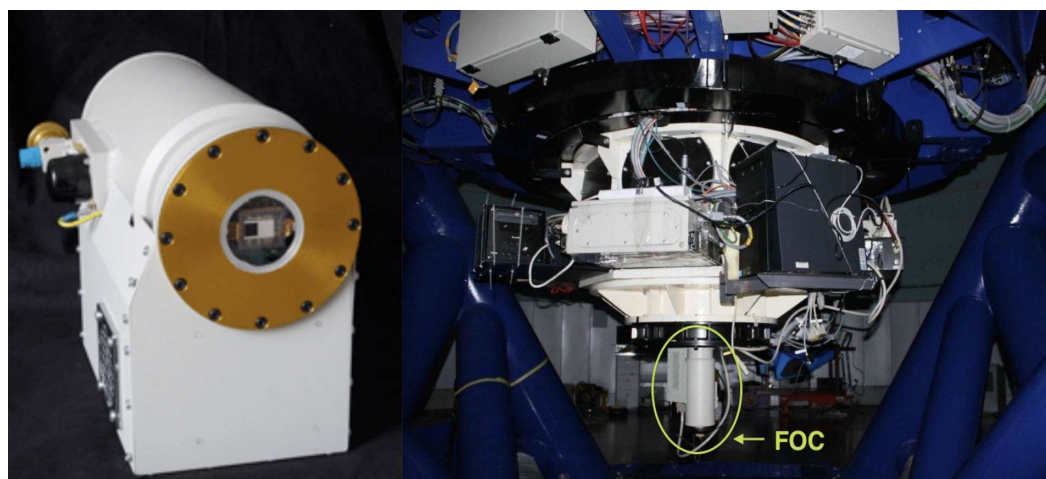


图 1 FOC照片. 左: FOC外观照片; 右: FOC安装于丽江2.4 m望远镜上的照片.

Fig. 1 The photo of the FOC. Left: The photo of the profile of FOC; Right: The photo of FOC installed on the Lijiang 2.4 m telescope.

3 观测

MAXI J1820+070在2018年的爆发中, X射线低频QPO在其处于硬态时的几十天内应该一直存在. MAXI J1820+070在2018年初被发现后, 其X射线低频QPO信号被多次观测到, 并且其频率在爆发过程中不断演化^[48, 60-62]. MAXI J1820+070光学低频QPO由本文作者团队于2018年4月1日利用丽江2.4 m望远镜和YFOSC测光观测首先发现(参见ATel 11510^[56]), 随后又有多个光学观测探测到进一步频率演化中的光学QPO信号^[57-59]. 2018年4月初X射线观测发现MAXI J1820+070低频QPO频率有增加到1 Hz及以上频率的趋势, 我们于是触发丽江望远镜机遇观测, 以期对其光学低频QPO的起源和物理机制进行研究.

在2018年4月22日、5月26日和8月31日(UTC) 3个测光夜特定时间窗口, 我们都首先使用FOC最小可用帧间间隔的全帧观测模式对目标源MAXI J1820+070进行观测, 以便覆盖较多的参考源, 获得更高质量的数据. 机遇观测时长有限, 在这3个测光夜的短暂观测中, 我们分别获得223037、126382和159876张全帧图像, 总曝光时间分别达5100 s、2890 s和3655 s. 第1个和第3个测光夜的观测条件相对更好, 在结束全帧模式观测后, 我们探索性地对MAXI J1820+070进行了约10 min 1/4帧CCD (512 × 128像素)模式观测, 获得高达约6 ms时间分辨的黑洞双星曝光图像. 在结束观测后, 都进行常规测光夜的天空平场(flat)拍摄和暗场(dark)拍摄. 因为观测时间和窗口有限, 我们尽力获取最多的观测数据. 我们分别拍摄全帧和1/4帧模式5 s帧间间隔的天空平场各5幅, 从而得到全帧和1/4帧平均平场. 由于FOC没有机械快门, 因此我们采用遮光板挡住CCD的方法拍摄暗场. 在进行暗场拍摄时, 为保证暗场的暗电流强度与待校准图像的暗电流强度近似相同, 我们采用与待校准图像相同的帧间间隔设置, 分别获得最小帧间间隔和5 s帧间间隔的全帧和1/4帧暗场图像各5幅, 从而得到最小帧间间隔和5 s帧间间隔的全帧和1/4帧平均暗场. 为了获得更多的光子数研究光变, 所有观测均没有使用滤光片. 表1中我们列出

了这3次观测的详细信息. 由于5月26日测光夜的天气为多云, 观测数据和处理较复杂. 因此, 我们将校准观测的数据分析重点放在4月22日和8月31日两个测光夜的观测数据上.

表 1 2018年对MAXI J1820+070的详细观测信息

Table 1 Detailed information of the observations of MAXI J1820+070 in 2018

Date	Start time (UTC)	Observation time/s	Number of frames	Frame
2018-04-22	20:20:31	5100	223037	full-frame
2018-04-22	21:48:07	1400	238650	1/4-frame
2018-05-26	19:36:35	2890	126382	full-frame
2018-08-31	12:37:52	3655	159876	full-frame
2018-08-31	13:39:50	880	150000	1/4-frame

4 数据处理

4.1 图像预处理

我们依照Image Reduction and Analysis Facility (IRAF)^[65-67]程序中标准图像预处理步骤对观测CCD图像做以下改正计算: 首先, 由于我们获得的平均暗场图像同时包含本底(BIAS)和暗电流成分, 因此我们对观测源图像和平场图像减去与其帧间间隔相同的平均暗场图像, 实现对源图像和平场图像的本底和暗电流改正; 随后, 用平均平场图像除以平场中位数得到归一化平场; 最后用减掉本底和暗电流的源图像除以归一化平场, 最终得到经过本底、暗电流和平场改正的观测源图像. 我们对所有全帧和1/4帧模式观测得到的原始源图像都进行了以上预处理改正.

图2显示了FOC不同观测模式下对MAXI J1820+070的观测视场. 全帧和1/4帧模式观测图像示意图如图2左图所示. 以全帧观测模式为例, 在我们的视场中, 除了目标源(target) MAXI J1820+070以外, 还有4颗亮源可以作为参考源(comparison star No. 1-4); 而在1/4帧模式观测视场中, 仅有一颗亮源可以作为参考源(标记为No. 1). 通过对比CCD图像和相同天区附近的星图(来自STScI-DSS²)中亮源的位置(图2右图), 我们可以确认视场中各个源名和坐标. 表2列出视场中目标源和可用参考源对应Gaia DR2^[46, 68]发布的源名(ID)和坐标.

4.2 孔径测光与最佳孔径选择

单次观测连续获得的CCD图像数在12万张以上, 图像总数接近百万张, 且观测对象处于爆发演化中, 我们需要尽快取得时变观测数据, 验证光学低频准周期振荡的探测结果. 从观测源CCD图像(图2左上图)中可以看到, 视场中多个亮源分布较稀疏, 因此我们选择测光效率较高的孔径测光方法. 我们使用标准IRAF孔径测光程序^[65-67]计算经过预处理的CCD图像中目标源和各参考源(全帧模式为4个参考源, 1/4帧模式为一个参考源)的强度. 我们首先确定一个测光孔径序列, 最小值为一个像素, 最大值为图像中最亮源(目标源)半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)的3倍(约25个像素), 序列动

²基于空间望远镜研究所-数字巡天(Space Telescope Science Institute-Digitized Sky Survey, STScI-DSS)的数据.

态间隔为一个像素. 通过这个孔径序列, 我们对每1帧图像中的目标源和明亮的可用参考源进行孔径测光, 从而获得它们每1帧图像的强度序列.

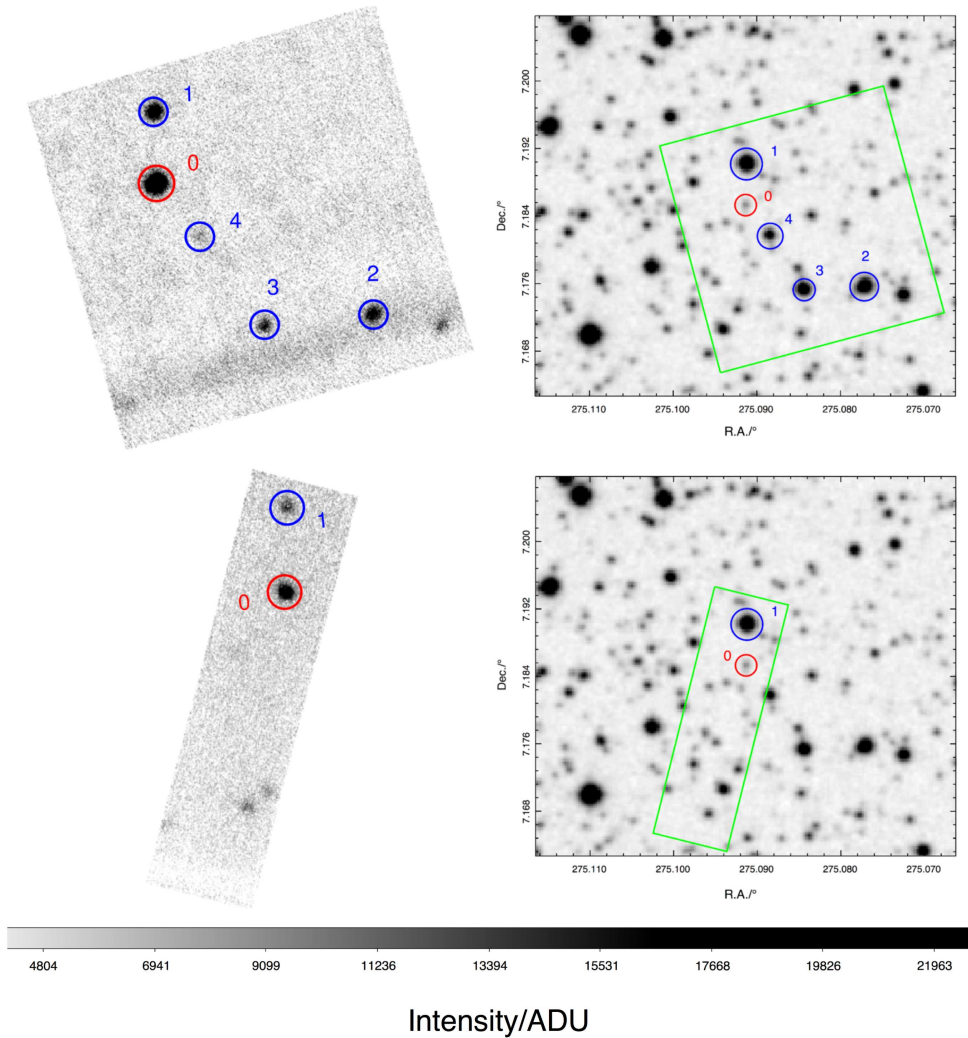


图 2 MAXI J1820+070 光学观测视场. 左图: 全帧和 1/4 帧观测模式实测图像. 右图: MAXI J1820+070 和参考源附近天区星图(来自 STScI-DSS) 和 FOC 观测视场. 红色圆圈标记目标黑洞双星 MAXI J1820+070 的光学对应体, 蓝色圆圈标记各个明亮参考源. 图中参考源所标记的编号与表 2 中的编号对应. 绿色矩形框表示与 FOC 采集 CCD 视场相对应的天区, FOC 挂载在丽江 2.4 m 望远镜的全帧模式视场约为 $91'' \times 91''$, 1/4 帧模式视场约为 $91'' \times 22.75''$. 像素值的单位为模数转换单元(Analog-Digital Unit, ADU).

Fig. 2 The FoV of MAXI J1820+070 in optical band. Left panel: The images for full-frame and 1/4-frame observation modes. Right panel: The STScI-DSS images of the sky region corresponding to MAXI J1820+070 and comparison stars and the FoV of the FOC. The red circle marks the optical counterpart of the BHXRB MAXI J1820+070. The blue circles mark the comparison stars. The labels of the comparison stars follow Tab. 2. The green squares mark the FoVs of $\sim 91'' \times 91''$ corresponding to the full-frame and $\sim 91'' \times 22.75''$ corresponding to the 1/4-frame of FOC installed on the Lijiang 2.4 m telescope, respectively. The unit of the pixel's value is the ADU.

表 2 FOC观测视场中MAXI J1820+070与参考源的星等和坐标
 Table 2 MAXI J1820+070 and the comparison stars in the FoV of FOC and their magnitudes and coordinates

Source Name/Gaia ID	Source No. ^a	Magnitude ^b	Coordinate (J2000) ^b	
			R.A.	Dec.
MAXI J1820+070 (4477902563164690816)	0	17.41	18:20:21.94	+07:11:07.19
4477904044937291520	1	13.55	18:20:21.92	+07:11:24.86
4477902528804856704	2	14.04	18:20:18.55	+07:10:32.83
4477902567468536832	3	14.42	18:20:20.30	+07:10:31.34
4477902567468538880	4	15.48	18:20:21.26	+07:10:54.43

^a The numbers are corresponding to those in Fig. 2;

^b Gaia DR2^[46, 68].

由于大气状态等观测条件时刻在改变, 对于每1帧图像的测光, 原则上都需要通过计算得到合适的测光孔径. 我们通过比较某1帧图像的天光背景和视场中最亮源(目标源)随孔径变化的平均强度, 得到这1帧的最佳测光孔径. 图3展示了测光孔径的选择方法. 以某1帧图像为例, 首先, 我们通过上述测得的视场中最亮源的强度序列计算得到与孔径序列对应的平均强度变化, 如图3左图所示, 这一平均强度变化显示了以源像素中心格点为起始, 随着孔径半径的增加源平均强度的变化. 图3右图分别用1维和2维高斯分布模拟了点源强度随孔径像素数尺度的分布, 可以看到源中心的强度最高, 随着孔径的增大而强度减弱. 在选择测光孔径时, 一方面要尽可能将源的强度都计算在内, 这要求孔径足够大; 另一方面要尽量排除天光背景的影响, 且不能覆盖其他源的强度, 这要求孔径不能过大. 我们选择平均强度大于天光背景 1σ 上限对应的孔径序列中的像素数最大值为这1帧图像的最佳测光孔径(如图3左图中星号), 以同时满足上述两个条件. 对全帧和1/4帧观测模式的每1帧图像, 我们都采用以上方法确定其最佳测光孔径. 原则上不同亮度的源应该有各自不同的最佳孔径, 但由于我们进行的是高时间分辨观测, 强度动态范围大, 且短时标下参考源和目标源并不具有各自恒定一致的点源扩展函数(比如大气湍动影响), 而后续测光校准时我们采用全部4个参考源的平均作为总参考源, 以利用统计方法降低涨落的影响, 所以我们对这1帧图像中的目标源和参考源采用统一的孔径进行测光, 进而得到这1帧图像中源的强度. 我们对获得的每1帧图像都计算一个最佳孔径进行测光, 进而得到每1帧图像中源的强度, 最终获得目标源和参考源的原始光变曲线.

5 数据分析

5.1 帧间间隔与读出噪声的研究

我们的FOC工控机系统记录每帧图像的时间因设置不同可以精确到1 s或2 s, 并且按照先后连续记录帧数序号. 我们需要从这些原始记录中推算每帧对应的时间, 并探究

帧间采样的实测稳定性. 具体介绍如下: 通过计算一段时间与这段时间内获得的图像总数的比值, 我们可以得到平均帧间间隔. 我们首先选择一个目标时间窗(间隔), 在一次观测整个曝光时长上滑动目标时间窗, 并统计在此时间窗内获得的图像帧数的变化情况, 由此可以得到在整个曝光时间内每个目标时间窗每秒平均图像数的分布, 从而得到每秒平均图像数的平均值和标准差, 最终推断出相应目标时间窗的平均帧间间隔和标准差.

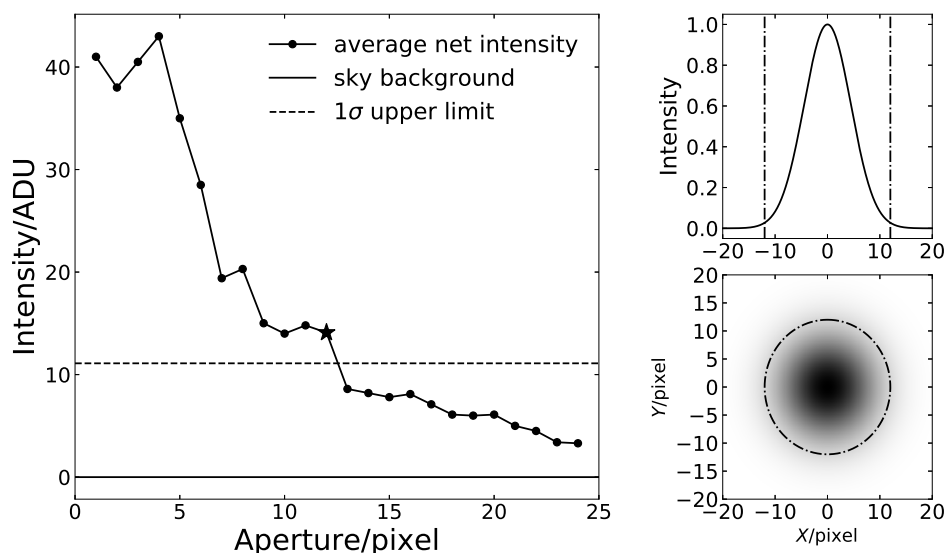


图3 测光孔径选择. 左图: 以目标源像素中心格点(pixel)为起点, 点源平均强度随着测光孔径增大的变化曲线. 黑色实线和圆点表示净强度, 即减去天光背景后的强度. 天光背景以水平实线表示, 天光背景 1σ 上限以水平虚线表示. 五角星对应的值表示这1帧最佳测光孔径为12个像素, 表示平均强度大于天光背景 1σ 上限对应的孔径序列中的像素数最大值为12. 右图: 以1维(上)和2维(下)高斯分布模拟的点源的强度随孔径像素数尺度的分布. 垂直点虚线(上)和圆点虚线(下)表示孔径.

Fig. 3 The selection of aperture in our analysis. Left panel: The profile of the average net intensity of the target against the aperture pixels. The star marks the optimal aperture of 12 pixels for this individual image, which is the maximum in the aperture sequence corresponding to the average net intensity that is above the 1σ upper limit (horizontal dashed line) of the sky background (horizontal solid line). Right panel: The intensity distribution of a point source with 1-D (top) and 2-D (bottom) Gaussian distribution. The vertical dash-dot line (top) and the dash-dot circle (bottom) represent the aperture.

我们通过每秒平均图像数的分布来研究FOC的帧间间隔(如图4所示). 在研究中, 我们选择4个目标时间窗, 分别为1 s、2 s、10 s和60 s, 并对4月22日观测夜的全帧和1/4帧模式观测数据进行上述分析, 对应的每秒平均图像数的直方图分布如图4上图所示. 表3展示了4月22日观测夜两种观测模式下4个目标时间窗对应的每秒平均图像计数, 以及作为对比的5月26日和8月31日观测夜的每秒平均图像计数. 可以看到, 4个目标时间窗对应的每秒平均图像计数为 $(43.733 \pm 1.299) \text{ s}^{-1}$ 、 $(43.733 \pm 0.693) \text{ s}^{-1}$ 、 $(43.733 \pm 0.106) \text{ s}^{-1}$ 、 $(43.733 \pm 0.022) \text{ s}^{-1}$ (全帧模式)以及 $(170.420 \pm 4.902) \text{ s}^{-1}$ 、 $(170.426 \pm 2.417) \text{ s}^{-1}$ 、 $(170.425 \pm 0.436) \text{ s}^{-1}$ 、 $(170.426 \pm 0.082) \text{ s}^{-1}$ (1/4帧模式). 由此可以计算平均帧间间隔分别为 $(22.866 \pm 0.679) \text{ ms}$ 、 $(22.866 \pm 0.362) \text{ ms}$ 、 $(22.866 \pm 0.055) \text{ ms}$ 、

(22.866 ± 0.011) ms (全帧模式)和(5.868 ± 0.169) ms、(5.868 ± 0.083) ms、(5.868 ± 0.015) ms、(5.868 ± 0.003) ms (1/4帧模式)(参见表3). 可以看到不同目标时间窗对应的平均帧间间隔在0.001 ms保持一致, 这表明了FOC在整个观测中具有很好的时间采样稳定性. 我们进一步比较了在4月22日和5月26日全帧观测模式在1 s目标时间窗下的每秒平均图像数的分布以及4月22日和8月31日1/4帧观测模式在2 s目标时间窗下的每秒平均图像数的分布(图4下图). 可以看到, 不同观测夜相同观测模式的每秒平均图像数的分布具有相似性. 这表明FOC在不同日期多次观测中的平均帧间间隔也保持稳定. 经过以上分析, 我们采用2018年4月22日测得的平均帧间间隔作为FOC帧间间隔, 进行下述后续研究和推算.

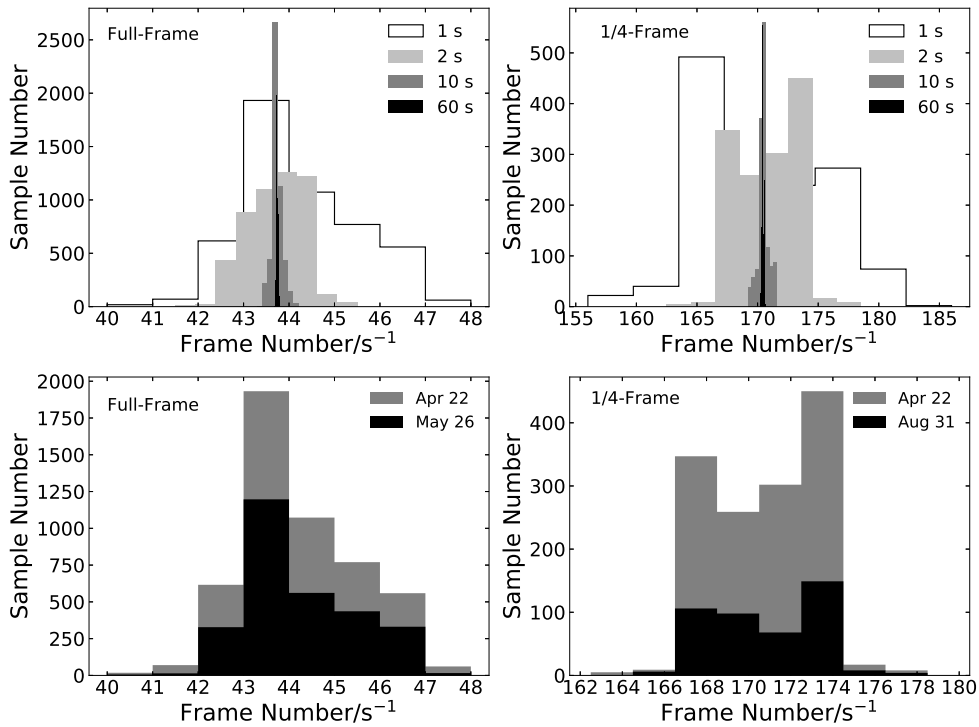


图4 光学观测帧频研究. 上图: 4月22日观测夜的全帧(左)和1/4帧(右)模式观测分别在目标时间窗1 s、2 s、10 s、60 s (灰度由浅至深)下的每秒平均图像数分布. 左下图: 4月22日(灰)和5月26日(黑)全帧模式观测在1 s目标时间窗下的每秒平均图像数分布. 右下图: 4月22日(灰)和8月31日(黑)1/4帧模式观测在2 s目标时间窗下的每秒平均图像数分布.

Fig. 4 The investigation of actual frame times during our optical observations. Upper panel: The distribution of the frames per second for the observations in full-frame and 1/4-frame modes, respectively, performed on April 22, under the targeted time window of 1 s, 2 s, 10 s and 60 s intervals. Lower-left panel: The distribution of the frames per second for the observations in full-frame mode performed on April 22 (gray) and May 26 (black) under the targeted time window of 1 s intervals. Lower-right panel: The distribution of the frames per second for the observation in 1/4-frame mode under the targeted time window of 2 s intervals performed on April 22 (gray) and August 31 (black).

FOC的CCD理论最大读出速率为15 MHz, 即全帧模式读出时间约0.019430 s, 1/4帧模式读出时间约为0.004858 s. 帧转移CCD在最小帧间间隔时的曝光过程与读出过程是

同步的,理论上曝光时间等于读出时间,即全帧模式曝光时间约为0.019430 s, 1/4帧模式曝光时间约为0.004858 s. 我们测得的全帧模式帧间间隔为0.022866 s, 1/4帧模式帧间间隔为0.005868 s, 超出时间应包含帧转移等过程的时间消耗.

在最小帧间间隔拍摄的暗场近似等于本底的情况下,我们利用5 s帧间间隔的平场图像与最小帧间间隔的暗场图像,按照读出噪声计算方法^[69-70],我们得到CCD在15 MHz下的读出噪声约为19.8 e⁻rms,略大于理论读出噪声14 e⁻rms. 但此结果还需更多可靠性分析和检验.

表 3 FOC观测平均帧间间隔测量

Table 3 The measurements of the average frame time of the FOC during our observations

Date	Targeted time window/s	Average frame time/ms	
		full-frame	1/4-frame
2018-04-22	1	22.866 ± 0.679	5.868 ± 0.169
2018-04-22	2	22.866 ± 0.362	5.868 ± 0.083
2018-04-22	10	22.866 ± 0.055	5.868 ± 0.015
2018-04-22	60	22.866 ± 0.011	5.868 ± 0.003
2018-05-26	1	22.866 ± 0.649	N/A
2018-08-31	2	22.867 ± 0.364	5.868 ± 0.085

5.2 视场中亮源的光变曲线

我们通过孔径测光得到视场中目标源和可用参考源(全帧模式观测有4个, 1/4帧模式观测有一个)的原始光变曲线. 图5为这些源的原始光变曲线示例. 图5上图显示了8月31日全帧模式观测得到的MAXI J1820+070和视场中4个参考源的一段原始光变曲线. 为了较清晰地显示光变曲线的变化,我们设置时间分辨为1 s. 全帧模式视场中的目标源和4个参考源的光变曲线无论在长时标(几百秒)还是短时标(几秒)上都出现了相似的变化趋势,例如0-500 s左右5个源的光变曲线都出现了先下降后上升的变化趋势,并且5个源的光变曲线在多处同时出现相似的陡降(dip). 目标源和参考源同时出现的强度变化是由于大气、月光等观测条件系统性变化引起.

为了消除系统性变化带来的影响,我们采取如下的校准过程:以全帧模式观测为例,首先我们将4个可用参考源的原始光变曲线相加后除以4,得到1条参考源平均光变曲线,随后将目标源的原始光变曲线除以这条平均光变曲线,以消除大气等系统性变化的影响. 最后我们用上一步得到的结果乘以参考源平均光变曲线强度的平均值,得到该观测时段强度归一化的目标源校准光变曲线. 我们对4个参考源也进行同样的校准,用来分析和检验我们测光结果的可靠性和局限. 图5下图显示了MAXI J1820+070和4个参考源经过上述校准过程后得到的校准光变曲线,可以看到,观测条件等系统性变化引起的原始光变曲线在0-500 s时间段的变化和四处陡降在校准光变曲线中得到明显修正. 需要指出的是,因为观测夜湿度大,接近望远镜关顶条件,因此在观测中,相机窗口逐渐结露且不规则. 观测过程中露水的积累和演化伴随各个源在视场中的漂移,会引起各个源测量强

度各自不同的缓慢演变. 实际观测中, 丽江2.4 m望远镜能保证观测对象和参考源在视场中缓慢移动而不出视场的时标大约为30 min, 上述因素引起不同源强度各不相同的缓慢调制. 由于我们的科学目标是致密天体短时标的相对光变, 这些因素引起的缓慢演变并不影响快速测光结果.

对4月22日、5月26日和8月31日的全帧模式观测, 视场中的可用参考源较多; 其中4月22日和8月31日观测条件较好, 可用参考源有4个, 5月26日观测条件较差, 可用参考源为2个. MAXI J1820+070视场内多个明亮参考源的存在使得我们可以通过计算参考源平均光变曲线的方法更好地降低随机涨落的影响. 4月22日和8月31日的1/4帧模式观测由于视场较小, 只有一个可用参考源(参考源No. 1). 类似地, 我们将目标源原始光变曲线除以参考源原始光变曲线再乘以其平均值, 从而得到1/4帧模式观测模式下目标源校准后的光变曲线.

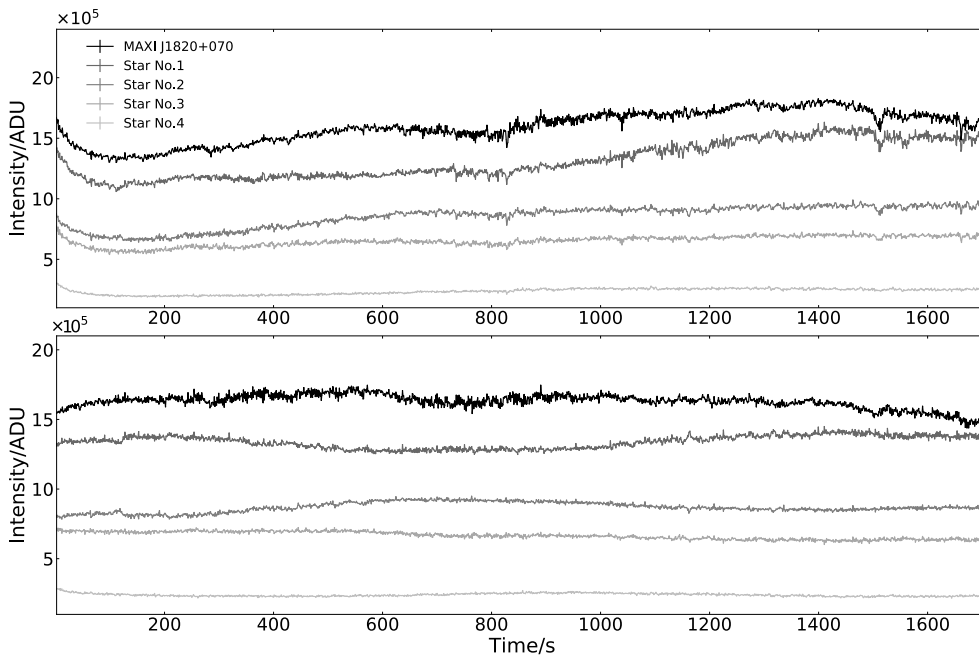


图5 实测光变曲线示例. 上图: 8月31日全帧模式观测的原始光变曲线示例. 黑色代表目标源MAXI J1820+070, 灰色由深至浅代表4个参考源. 下图: 与上图对应同一时段得到的MAXI J1820+070 (黑)和4个参考源校准光变曲线(灰色由深至浅). 时间分辨为1 s.

Fig. 5 Examples of source light curves obtained with our FOC observations. Upper panel: The example of the original light curve of MAXI J1820+070 and the four comparison stars extracted from the full-frame observations performed on August 31. Lower panel: The calibrated light curve of MAXI J1820+070 (black) and the four comparison stars (from dark to light). The time resolution is 1 s.

5.3 光变曲线的功率谱分析

得到源的光变曲线后, 我们需要进一步对他们的功率谱进行分析, 目的是研究观测系统的本征时变周期或准周期信号, 包括FOC测光系统仪器信号, 望远镜光学系统与望远镜机械系统信号以及可能由大气运动引起的望远镜抖动等产生的时变信号. 从而通过

进一步校准, 获得可信度更高的目标源天体的光变信号.

图6显示了我们对目标源和参考源的功率谱分析结果. 我们首先对4月22日全帧模式观测得到的目标源和4个参考源原始光变曲线做快速傅里叶变换而得到其对应的功率谱, 并对其进行简单的Leahy归一化^[71]. 考虑到我们的科学目标是短时标光变信号, 所以我们对全帧模式数据选择了最短时间分辨0.022866 s, 做傅里叶变换的每个时间片段(segment)长度约为187 s, 包含8192个数据点. 目标源和4个参考源的原始功率谱结果如图6左上图所示. 在未扣除噪声成分的情况下, 4个参考源的功率谱轮廓相似, 目标源的功率谱则显著不同, 初步表明FOC探测到了黑洞双星MAXI J1820+070的光变信号. 在约0.4 Hz处, 4个参考源的原始功率谱都在连续成分上出现相似的周期信号, 暗示这一信号不可能来自源本身, 而可能来自仪器或者望远镜的调制信号. 尽管目标源数据在此频率的信号并不明显, 我们推测这是由于目标源的光变幅度更强, 功率谱显示在这一频率范围目标源的总体光变较大(其幅度远远大于参考源). 此外, 目标源在约0.16 Hz有一个明显QPO信号, 而所有参考源功率谱中都没有这一信号. 这就是黑洞双星MAXI J1820+070中的光学低频QPO (参见ATel 11510^[56]和ATel 11591^[57]), 其频率为 (0.157 ± 0.002) Hz, FWHM为 (0.030 ± 0.006) Hz, 相对rms约 $4.1\% \pm 0.3\%$, 与雨燕卫星(Swift/XRT)及其他X射线卫星探测的X射线QPO频率一致. 关于黑洞双星QPO的结果我们将专文进行研究. 最终我们得到4月22日全帧观测模式下目标源校准光变曲线的傅里叶功率谱(图6右上图). 值得注意的是, 参考源No. 1的功率谱在约0.25 Hz的信号成分并没有出现在其他参考源的功率谱中, 我们还无法确定这一光变信号的来源, 但其可能来自这个源本身.

我们进一步研究8月31日全帧模式观测的目标源和4个参考源原始光变曲线对应的功率谱(参见图6左下图). 4个参考源的功率谱的整体轮廓与4月22日观测相比没有明显变化, 表明这些源的光变性质在两次观测中没有出现明显的改变. 而目标源的功率谱则显示出显著不同, 揭示了目标源在8月31日观测中光学光变性质发生了显著变化. X射线监测数据表明该黑洞双星已经进入X射线软谱态, 因此我们的光学观测与X射线谱态观测一致, 由幂律成分主导. 同时, 目标源和参考源的原始功率谱都有一个明显的信号出现在约0.33 Hz处, 而且在约1 Hz也都出现一个相对较弱的信号. 这表明它们是来自仪器、望远镜或大气等影响因素调制造成的光变信号. 但4月22日和8月31日出现的非本征信号的频率并不相同. 同样的, 8月31日全帧模式观测目标源校准光变曲线的功率谱(图6右下图)中在约0.33 Hz和约1 Hz也出现了这些信号, 说明前述对光变的校准过程只对类似大气等观测条件变化带来的非本征光变的校准有效, 系统性影响并不一定可以完全消除.

我们进一步对4月22日和8月31日1/4帧模式观测的光变曲线(目标源和参考源No. 1)做上述功率谱分析, 在4月22日1/4帧模式观测中, 参考源No. 1原始光变曲线的功率谱在约0.4 Hz出现类似当日全帧模式观测的功率谱信号. 8月31日的1/4帧模式观测数据显示, 参考源No. 1和目标源的功率谱都在约0.33 Hz出现相似信号. 这一非本征信号和FOC的帧间间隔设置无关, 因此我们认为在同一天的观测中, 这个信号也很可能与FOC关系不大.

4月22日的1/4帧模式观测中, 目标源MAXI J1820+070的原始光变曲线和校准光变曲线的功率谱都证实约0.16 Hz的光学QPO. 在排除了功率谱中的非本征信号后, 我们成

功获得目标源MAXI J1820+070的傅里叶功率谱, 并探测到其中的特征时域光变信号, 即中心频率约0.16 Hz的光学QPO. 这不仅验证了FOC全帧和1/4帧观测模式的可靠性, 也证明FOC具备探测明亮天体秒时标以下(短至5 ms)的快速光变信号的能力.

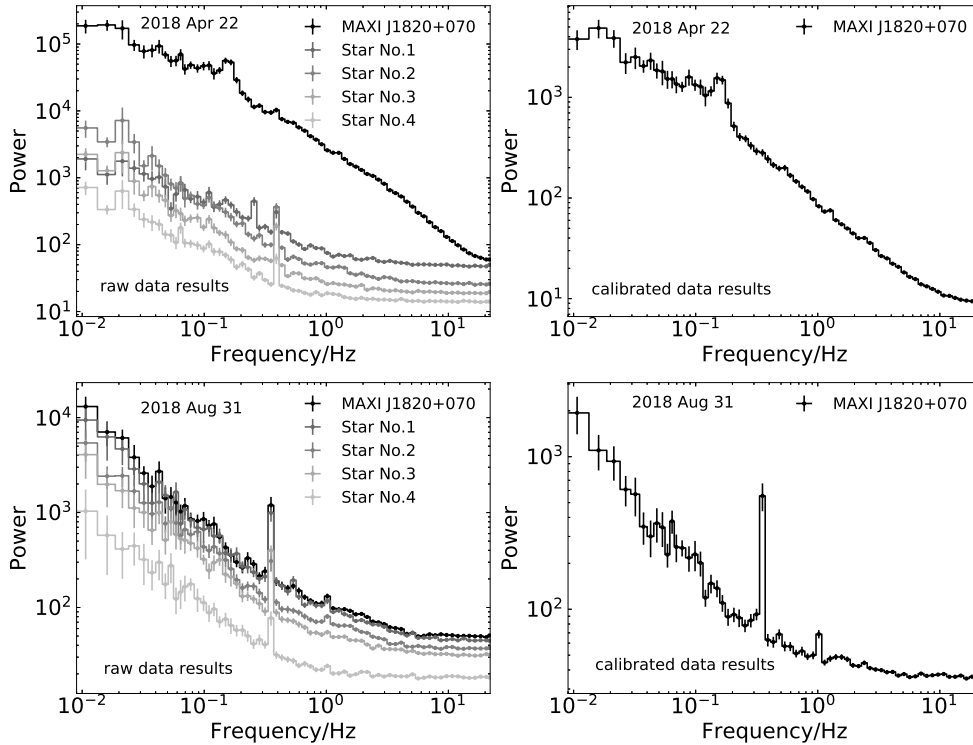


图6 黑洞双星MAXI J1820+070光学波段傅里叶功率谱分析. 左上图: 4月22日全帧观测模式MAXI J1820+070 (黑)和4个参考源(灰色由深至浅)光变曲线功率谱. 右上图: 4月22日全帧观测模式MAXI J1820+070校准后的功率谱. 左下图: 8月31日全帧观测模式MAXI J1820+070 (黑)和4个参考源(灰色由深至浅)光变曲线功率谱. 右下图: 8月31日全帧观测模式MAXI J1820+070校准后的功率谱. 功率谱采用对数re-bin, 系数为1.1.

Fig. 6 Fourier power spectral analysis of the optical light curves of the BHXR MAXI J1820+070. Upper-left panel: The power spectra of the original light curves of MAXI J1820+070 (black) and four comparison stars (from dark to light) obtained in the full-frame observation on April 22. Upper-right panel: The power spectrum of the calibrated light curve of MAXI J1820+070 obtained on April 22. Lower-left panel: The power spectra of the original light curves of MAXI J1820+070 (black) and four comparison stars (from dark to light) in the full-frame observation on August 31. Lower-right panel: The power spectra of the calibrated light curve of MAXI J1820+070 obtained on August 31. We re-binned the power spectra in an appropriate logarithmic factor of 1.1.

6 总结与讨论

我们在2018年4—8月通过对黑洞暂现源MAXI J1820+070 X射线爆发过程中的3次光学高速测光观测, 验证了FOC的短时标测光实测性能. 通过分析相机观测的帧间间隔、目标源和可用参考源的光变曲线和功率谱证实了FOC拥有探测约5–25 ms短时标光变的快速光学测光能力. 帧间间隔分析表明, FOC全帧模式的平均帧间间隔为 $(22.866 \pm$

0.679) ms, 1/4帧模式的平均帧间间隔为 (5.868 ± 0.169) ms, 相对误差不大于3%, 证明相机可以用来研究短至5 ms的光变信号. 我们通过5 s帧间间隔的平场和最小帧间间隔的暗场, 按照公式^[69-70]计算得到读出噪声为 $19.8 e^-rms$, 略高于理论值 $14 e^-rms$, 此结果还需要更多的可靠性分析和检验.

在3次观测中, 我们使用FOC在全帧模式下获得2890–5100 s的连续光变曲线, 在1/4帧模式下获得880–1400 s的连续光变曲线, 证实了FOC在全帧和1/4帧模式下连续快速测光能力. 通过比较参考源和目标源在同一次观测与不同次观测中原始功率谱及校准功率谱, 区分源的本征光变和可能由包括相机在内的设备以及望远镜抖动等带来的非本征光变, 成功探测到目标源MAXI J1820+070中的光学QPO信号并测量其相对光变幅度(fractional root-mean-square), 最终证明FOC具备探测秒时标以下的致密天体快速光变的能力.

在4月22日的观测中, 无论是全帧还是1/4帧模式的观测, 视场中目标源和4个可用参考源的功率谱都具有约0.4 Hz的光变信号, 我们有理由认为这是由于仪器或望远镜等观测因素产生的非源本征光变信号. 8月31日的全帧和1/4帧模式观测得到的功率谱中, 类似信号出现在约0.33 Hz和约1 Hz. 值得注意的是, 在4月22日观测的功率谱中, No. 1参考源在约0.25 Hz处显示了一个特别的光变信号, 这一信号并没有出现在视场中其他参考源及观测对象的功率谱中. 我们推测这一信号可能是No. 1参考源的本征光变, 这需要未来更多对该参考源的观测加以验证.

致谢 丽江2.4 m望远镜由中国科学院和云南省政府共同资助, 并由云南天文台和中国科学院大科学中心联合运行和管理. 我们感谢云南天文台白金明台长对本次机遇观测的批准, 感谢云南天文台王建国、伦宝利、王传君等的协助和贡献. FOC相机是剑桥大学CCD 6200系统配备E2 V CCD 97的定制版本, 我们要感谢剑桥大学Craig Mackay教授和马普天文所Henk Spruit博士给予的持续帮助和鼓励.

参 考 文 献

- [1] Wijnands R, van der Klis M. *ApJ*, 1999, 514: 939
- [2] Klein-Wolt M, van der Klis M. *ApJ*, 2008, 675: 1407
- [3] Horne K. *MNRAS*, 1985, 213: 129
- [4] Marsh T R, Horne K. *MNRAS*, 1988, 235: 269
- [5] O'Brien K, Horne K, Hynes R I, et al. *MNRAS*, 2002, 334: 426
- [6] Stella L, Vietri M. *PhRvL*, 1999, 82: 17
- [7] Stella L, Vietri M, Morsink S M. *ApJL*, 1999, 524: L63
- [8] Kanbach G, Straubmeier C, Spruit H C, et al. *Nature*, 2001, 414: 180
- [9] Phelan D, Ryan O, Shearer A. *High Time Resolution Astrophysics*. Dordrecht: Springer, 2008: 37-52
- [10] Shapiro S L, Teukolsky S A. *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects*. New York: Wiley-VCH, 1983: 1-6
- [11] Lewin W H G, van der Klis M. *Compact Stellar X-ray Sources*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 1-34
- [12] Smak J. *PASP*, 1984, 96: 5
- [13] Lasota J P. *NewAR*, 2001, 45: 449
- [14] Warner B. *Cataclysmic Variable Stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 59-84
- [15] Warner B, Robinson E L. *NPhS*, 1972, 239: 2

- [16] Patterson J, Robinson E L, Nather R E. *ApJ*, 1977, 214: 144
- [17] Robinson E L, Nather R E. *ApJS*, 1979, 39: 461
- [18] Woudt P A, Warner B. *MNRAS*, 2002, 333: 411
- [19] Mauche C W. *ApJ*, 2002, 580: 423
- [20] Hasinger G, van der Klis M. *A&A*, 1989, 225: 79
- [21] van der Klis M. *Rapid Aperiodic Variability in Binaries*//Lewin W H G, van Paradijs J, van den Heuvel E P J, et al. *X-ray Binaries*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 252-307
- [22] Remillard R A, McClintock J E. *ARA&A*, 2006, 44: 49
- [23] Belloni T M. *States and Transitions in Black Hole Binaries*//Belloni T M. *The Jet Paradigm*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 53-84
- [24] Belloni T M, Stella L. *SSRv*, 2014, 183: 43
- [25] van der Klis M. *ARA&A*, 1989, 27: 517
- [26] Belloni T, Psaltis D, van der Klis M. *ApJ*, 2002, 572: 392
- [27] Belloni T, Homan J, Casella P, et al. *A&A*, 2005, 440: 207
- [28] Motta S, Muñoz-Darias T, Casella P, et al. *MNRAS*, 2011, 418: 2292
- [29] Belloni T M, Motta S E, Muñoz-Darias T. *BASI*, 2011, 39: 409
- [30] Miyamoto S, Kitamoto S, Iga S, et al. *ApJ*, 1994, 435: 398
- [31] Cui W, Heindl W A, Rothschild R E, et al. *ApJ*, 1997, 474: L57
- [32] Gilfanov M. *X-Ray Emission from Black-Hole Binaries*//Belloni T. *The Jet Paradigm*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 17-51
- [33] Gandhi P, Makishima K, Durant M, et al. *MNRAS*, 2008, 390: L29
- [34] Gandhi P, Bachetti M, Dhillon V S, et al. *NatAs*, 2017, 1: 859
- [35] Alfonso-Garzón J, Sánchez-Fernández C, Charles P A, et al. *A&A*, 2018, 620: A110
- [36] Motch C, Ricketts M J, Page C G, et al. *A&A*, 1983, 119: 171
- [37] Gandhi P, Dhillon V S, Durant M, et al. *MNRAS*, 2010, 407: 2166
- [38] Veledina A, Poutanen J, Ingram A. *ApJ*, 2013, 778: 165
- [39] Kalamkar M, Casella P, Uttley P, et al. *MNRAS*, 2016, 460: 3284
- [40] Baglio M C, Russell D M, Lewis F. *ATel*, 2018, 11418: 1
- [41] Torres M A P, Casares J, Jiménez-Ibarra F, et al. *ApJL*, 2019, 882: L21
- [42] Torres M A P, Casares J, Jiménez-Ibarra F, et al. *ApJL*, 2020, 893: L37
- [43] Kawamuro T, Negoro H, Yoneyama T, et al. *ATel*, 2018, 11399: 1
- [44] Tucker M A, Shappee B J, Holoiën T W S, et al. *ApJL*, 2018, 867: L9
- [45] Denisenko D. *ATel*, 2018, 11400: 1
- [46] Gandhi P, Rao A, Johnson M A C, et al. *MNRAS*, 2019, 485: 2642
- [47] Atri P, Miller-Jones J C A, Bahramian A, et al. *MNRAS*, 2020, 493: L81
- [48] Mereminskiy I A, Grebenev S A, Molkov S V, et al. *ATel*, 2018, 11488: 1
- [49] Russell D M, Baglio M C, Bright J, et al. *ATel*, 2018, 11533: 1
- [50] Shidatsu M, Nakahira S, Murata K L, et al. *ApJ*, 2019, 874: 183
- [51] Uttley P, Gendreau K, Markwardt C, et al. *ATel*, 2018, 11423: 1
- [52] Littlefield C. *ATel*, 2018, 11421: 1
- [53] Sako S, Ohsawa R, Ichiki M, et al. *ATel*, 2018, 11426: 1
- [54] Gandhi P, Paice J A, Littlefair S P, et al. *ATel*, 2018, 11437: 1
- [55] Bright J, Motta S, Fender R, et al. *ATel*, 2018, 11827: 1
- [56] Yu W F, Zhang J J, Yan Z, et al. *ATel*, 2018, 11510: 1
- [57] Yu W F, Lin J, Mao D M, et al. *ATel*, 2018, 11591: 1
- [58] Zampieri L, Fiori M, Burtovoi A, et al. *ATel*, 2018, 11723: 1
- [59] Fiori M, Zampieri L, Burtovoi A, et al. *ATel*, 2018, 11824: 1
- [60] Buisson D, Fabian A, Alston W, et al. *ATel*, 2018, 11578: 1
- [61] Stiele H, Kong A K H. *ApJ*, 2020, 889: 142
- [62] Mudambi S P, Maqbool B, Misra R, et al. *ApJL*, 2020, 889: L17

- [63] Fan Y F, Bai J M, Zhang J J, et al. RAA, 2015, 15: 918
- [64] Wang C J, Bai J M, Fan Y F, et al. RAA, 2019, 19: 149
- [65] Massey P, Davis L E. A User's Guide to Stellar CCD Photometry with IRAF. 1992: 5-29
- [66] Tody D. The IRAF Data Reduction and Analysis System. Instrumentation in astronomy VI; Proceedings of the Meeting, Tucson, AZ, Mar 4-8, 1986
- [67] Tody D. Astronomical Data Analysis Software and Systems II, A.S.P. Conference Series, 1993, 52: 173
- [68] Brown A G A, Vallenari A, Prusti T, et al. A&A, 2018, 616: A1
- [69] Massey P, Jacoby G H. Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1992, 23: 240
- [70] Howell S B. Handbook of CCD Astronomy. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 71-73
- [71] Leahy D A, Darbro W, Elsner R F, et al. ApJ, 1983, 266: 160

High Speed Photometric Performance of Fast Optical Camera During the 2018 Campaign of a Black Hole Transient

MAO Dong-ming^{1,2} YU Wen-fei¹ LIN Jie^{1,2} ZHANG Ju-jia³ YAN Zhen¹
ZHANG Hui¹ ZHANG Wen-da¹

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

ABSTRACT We performed the high-speed photometric observation of the black hole transient MAXI J1820+070 on April 22, May 26, and August 31, 2018 (UTC) with our Fast Optical Camera (FOC) installed on the Lijiang 2.4 m telescope at Lijiang Station of Yunnan Observatories. We analyzed the frame time of the FOC, obtained the light curves and power spectra of the target and several comparison stars in the same field of view to investigate the photometric performance of FOC. The frame time corresponding to the full-frame and 1/4-frame CCD (Charge Coupled Device) modes reached (22.866 ± 0.679) milliseconds and (5.868 ± 0.169) milliseconds, respectively. We use the average light curve of several comparison stars to calibrate the raw light curves of the black hole transient MAXI J1820+070 to obtain the calibrated light curves of the target in which the influence of variable weather conditions and instrumental effects have been mostly eliminated. By comparing and analyzing the original and calibrated power spectra of MAXI J1820+070 and those of the comparison stars, we detected an optical quasi-periodic oscillation (QPO) at ~ 0.16 Hz in the black hole transient MAXI J1820+070 in April 2018 and identified a few instrumental or atmospheric timing signals in the observations. This demonstrates the capability of our FOC in associating with the Lijiang 2.4 m telescope for high-speed photometry.

Key words stars: black holes, stars: variables, techniques: photometric