

doi: 10.3788/gzxb20184709.0904002

微通道板型 X 射线探测器的脉冲信号探测能力 实验分析

周庆勇^{1,2,3}, 盛立志⁴, 魏子卿^{2,3}, 刘思伟^{2,3}, 陈琛⁴, 姬剑锋^{2,3},
任红飞^{2,3}, 马高峰¹, 张彩虹^{5,6}, 孙鹏飞⁷

(1 信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450052)

(2 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

(3 西安测绘研究所, 西安 710054)

(4 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(5 武汉大学 GNSS 中心, 武汉 430079)

(6 中国地震局地震研究所 地震大地测量重点实验室, 武汉 430071)

(7 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘 要:为了掌握微通道板探测器的 X 射线脉冲信号观测能力,利用 X 射线脉冲星地面实验装置,开展了长时间的不同流强和不同背景噪声强度下的微通道板探测器脉冲信号探测实验,并建立了一套 X 射线探测器脉冲观测能力评估方法,推导出基于光子计时模式下 X 射线探测器的脉冲信号信噪比、脉冲轮廓相似度、脉冲到达时间精度和最小可探测功率的关系表达式.实验中,利用面积 20 cm²的微通道板探测器开展了 8 组 10 000 s 的实验,采集到有效观测数据,然后搜索最佳脉冲周期,重构观测脉冲轮廓,估计脉冲轮廓特征参数.实验表明,微通道板探测器具备良好的 X 射线脉冲信号观测与恢复能力,在较弱脉冲信号强度(光子流量密度为 0.05 ph/cm²/s)和较强背景噪声(背景噪声强度是脉冲信号的 16 倍)下获取观测脉冲轮廓的信噪比、相似度、脉冲到达时间观测精度分别为 35.73、88.38%、51.53 μs 和 64.89、89.72%、29.24 μs,验证了微通道板探测器具备一定的暗弱 X 射线脉冲星观测能力,且微通道板探测器的脉冲探测能力随着脉冲信号强度增加、背景噪声强度减弱、累积观测时间增加而提升.

关键词:X 射线探测;性能测试;微通道板探测器;地面测试系统;脉冲信号;X 射线脉冲星模拟源;脉冲轮廓;背景噪声

中图分类号:P172.2;TL816

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)09-0904002-11

Experimental Analysis of Pulse Signal Detection Capability of the MCP X-ray Detector

ZHOU Qing-yong^{1,2,3}, SHENG Li-zhi⁴, WEI Zi-qing^{2,3}, LIU Si-wei^{2,3}, CHEN Chen⁴, JI Jian-feng^{2,3},
REN Hong-fei^{2,3}, MA Gao-feng¹, ZHANG Cai-hong^{5,6}, SUN Peng-fei⁷

(1 Geographic Spatial Information Institute, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

(2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China)

(3 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)

(4 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(5 GNSS Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(6 Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China)

(7 College of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

基金项目:国家自然科学基金(Nos.41304006, 41374042, 41574013, 41374003)和地理信息工程国家重点实验室开放研究基金(No. SKLGE 2018-ZZ-3)资助

第一作者:周庆勇(1986—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为 X 射线探测技术. Email: zjzqy1986@163.com

收稿日期:2018-04-25; **录用日期:**2018-06-19

<http://www.photon.ac.cn>

Abstract: For analyzing the X-ray pulsed signal observation capability of micro-channel plate detector, a long-time experiment of micro-channel plate detectors under different radiation flux and different background noise was operated on the X-ray detector ground testing system. Meanwhile, a set of evaluation methods of pulse observation capability of X-ray detectors were established, the expressions of the signal-to-noise ratio, the correlation of pulse profile, the measurement accuracy of pulse arrival time, the minimum detectable power were derived based on the photon counting model. 8 groups of 10 000 s X-ray photon time-of-arrival dataset were received by the 20 cm² micro-channel plate detectors. Then the effective observation data were dealt with, the pulse period of each dataset was gained, the observable pulse profile was replicated, and their characteristic parameters were estimated. The experimental result shows that the micro-channel plate detector has a good capability of X-ray pulse signal observation and reconstruction, the signal-to-noise ratio, the correlation of pulse profile, the measurement accuracy of pulse arrival time of the observed pulse profile are 35.73, 88.38%, 51.53 μ s at the low pulse signal flux (the X-photon flux density is 0.05 ph/cm²/s), while those are 35.73, 88.38%, 51.53 μ s at strong background noise (the background noise is 16 times the intensity of the pulse signal). This result has revealed that the micro-channel plate detector has the observation ability of a certain faint X ray pulsar. The pulse detection capability of micro-channel plate detector is improved with the increase of the intensity of the pulse signal, the decrease of the background noise intensity and the increase of the accumulated observation time.

Key words: X-ray detector; Performance testing; Micro-channel plate detector; Ground testing system; Pulsed signal; X-ray pulsar simulator; Pulse Profile; Pulse noise

OCIS Codes: 040.1880;040.5160;040.7480

0 引言

X 射线天文学是接收天体 X 射线辐射信息探索宇宙的一门学科.国际上以研究宇宙大尺度结构的特性和早期宇宙、黑洞的形成和演化、太阳高能辐射机制为出发点,开展了大量的 X 射线空间观测和科学研究,其中以 X 射线脉冲星观测最具有代表性.X 射线脉冲星是超新星爆炸后的遗迹,其脉冲信号极其稳定且时间特性清晰,是大尺度空间结构研究的探针和深空导航的宇宙灯塔.利用毫秒脉冲星的 X 射线信号作为天然和超稳定的永久脉冲时间信号可实现航天器长时间自主定位和导航,也是当前国际上的研究热点^[1-3].X 射线探测器是探测高能粒子信号的器件,是 X 射线脉冲星导航系统和 X 射线空间观测平台的核心设备.我国空间 X 射线天文研究发展迅速,2016 年 11 月,我国发射了脉冲星导航实验 01 星(First X-ray Pulsar Navigation Satellite,XPNAV-1),核心目的是开展脉冲星导航空间实验和在轨验证国产探测器性能^[4-5];2017 年 6 月,我国发射了首颗 X 射线天文卫星硬 X 射线调制望远镜(Hard X-ray Modulation Telescope, HXMT).2018 年 1 月 18 日美国联邦航空航天署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)研究人员在自然杂志官网发布消息称,利用 X 射线计时与导航技术的空间站在轨验证实验项目(Station Explorer for X-Ray Timing and Navigation, SEXTANT)观测了 4 颗特定毫秒脉冲星,将数据融合确定了航天器位置,并与卫星全球定位系统(Global Positioning System, GPS)定位结果进行比较,发现仅利用 8 h 观测数据就将位置误差收敛到 16 km 半径范围内,最好可达 5 km^[5],意味着脉冲星导航具有良好的深空应用前景,其中高性能 X 射线探测器(X-ray Telescope Instrument, XTI)发挥着关键作用.

微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)探测器是一款面向 X 射线脉冲星空间探测和脉冲星导航应用的探测器,具有技术成熟、时间测量精度高和能够大规模集成等优点^[7-11].当前,我国已经研制出 MCP 探测器工程样机,开展了大量的性能测试实验,相关测试表明 MCP 探测器能够准确获取 X 射线光子,精确读出光子到达时刻^[12-15].由于空间导航使用的 X 射线毫秒脉冲星辐射流量弱且空间高能粒子环境复杂^[16],脉冲信号探测能力直接影响着 X 射线脉冲星空间观测及导航应用性能, MCP 探测器对微弱信号和强背景粒子环境下 X 射线脉冲星信号探测能力的测试评估显得尤为重要.中科院西安光学精密机械研究所的盛立志博士分析了探测器得到的脉冲轮廓信噪比随观测时间、光功率等因素的影响,确定脉冲信号观测的最佳电压阈值^[17-18].当前国内系统地开展研究 MCP 探测器脉冲信号探测能力的实验较少,观测试验次数也较少,脉冲观

测能力的评价集中于信噪比指标.本文利用 X 射线探测器地面测试装置开展实验,系统地分析了 MCP 探测器不同脉冲流量和背景噪声强度下 X 射线脉冲信号的采集及还原能力.

1 地面测试装置及处理方法

1.1 MCP 探测器及地面实验系统装置

MCP 是一款具有二维面阵微小通道组成的电子倍增器件,具有数百万个平行的电子倍增微通道,两片 MCP 能够实现 $10^5 \sim 10^6$ 倍电子增益^[19].MCP 探测器的工作原理如图 1 所示^[5],在 MCP 的两端施加 1 kV 左右的高压,当 X 射线光子穿过准直器、滤光膜与光电阴极,发生光电效应产生光电子,撞击 MCP 的输入端通道内壁时会产生次级光电子,次级电子在高压电场的作用下沿着微通道加速前进,通过与通道内壁的多次反复碰撞实现电子雪崩,最后输出大量的电子,被阳极接收.形成的电脉冲经快速电流灵敏放大、恒比定时 (Constant Fraction Discriminator,CFD) 和时间数字转换电路 (Time-to-Digital Converter, TDC) 得到光子到达时间.本文使用的 MCP 探测器是由中科院西安光学精密机械研究所研制的工程样机,面积为 20 cm^2 .

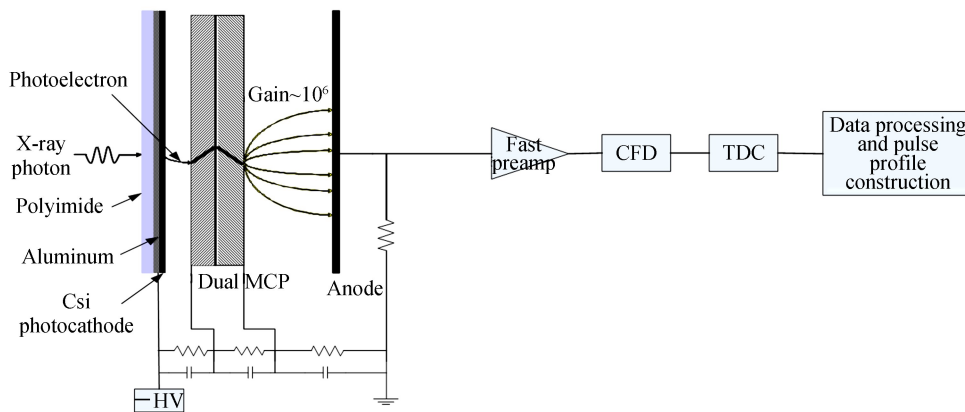


图 1 MCP 探测器工作原理示意图

Fig.1 Principle sketch map of MCP detector

MCP 探测器 X 射线脉冲信号探测实验是在 X 射线探测器地面测试系统上进行^[18,21].X 射线探测器地面测试系统的原理和实物分别见图 2、图 3.系统主要包括 X 射线脉冲信号调制及产生部分和 X 射线光子接收及处理部分.X 射线脉冲信号调制及产生部分通过 X 射线脉冲星模拟源(这里为栅控 X 射线管)加载脉冲信号^[22-23],调制出相同轮廓形状的离散 X 射线光子.X 射线光子接收及处理部分使用 MCP 探测器接收 X 射线光子,并进行测试评估处理,也可更换成其他 X 射线探测器进行测试.整个 X 射线光子的产生和接收都在地面测试系统真空管道中,真空管道长度为 1.2 m.整个地面测试系统的时间基准由常温晶振维持,时间频率

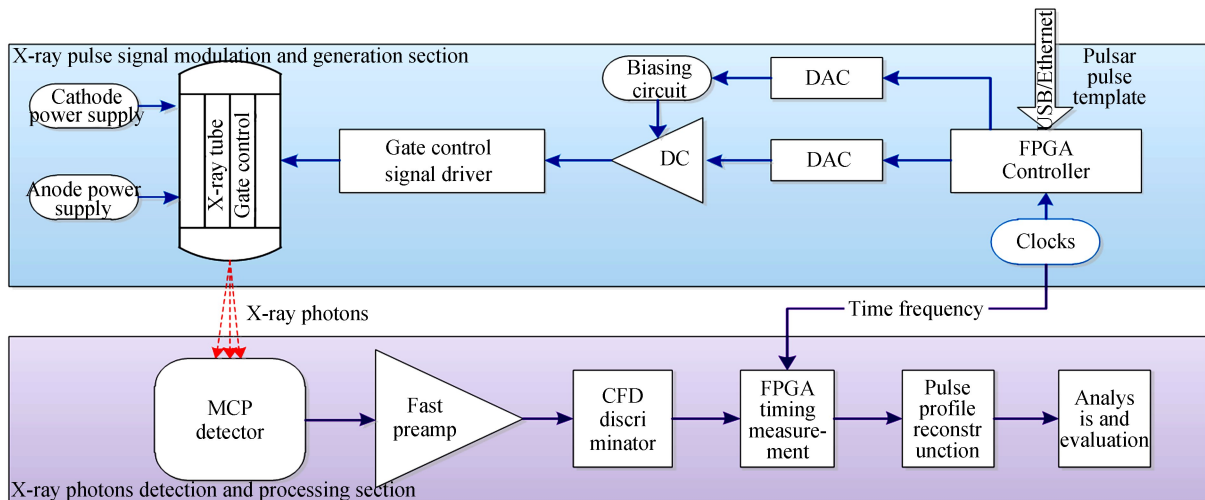


图 2 X 射线探测器地面测试系统示意图

Fig.2 Sketch map of X-ray detector ground testing system

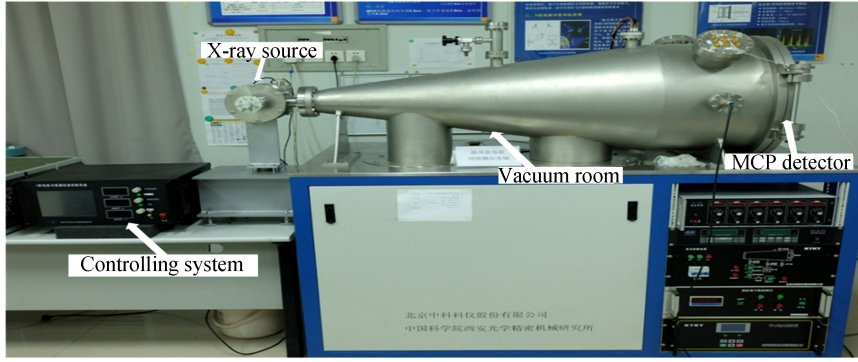


图3 X射线探测器地面测试系统实物图

Fig.3 Picture of X-ray detector ground testing system

日稳定度约为 10^{-10} . 地面测试过程是加载脉冲轮廓和周期信息, X射线脉冲星模拟源辐射特征能谱为 4.5 keV 的 X 射线光子束, X 射线光子被面积为 20 cm^2 的 MCP 探测器接收并转换成电脉冲信号. CFD 电路在每个电脉冲信号的恒比电处产生一个触发脉冲信号, 可编程电子门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 时间测量系统将记录每个触发脉冲时刻, 该时间即为光子到达时刻. 收集光子到达时间序列, 进行脉冲周期搜索, 重构观测脉冲轮廓, 从而评估 MCP 探测器脉冲探测能力. X 射线脉冲星模拟源与地面测试系统详细介绍请参考文献[18].

1.2 实验评估方法

X 射线脉冲星模拟源通过在上位机加载脉冲轮廓模板控制栅控 X 射线管的辐射功率, 调制出流量与周期可控的 X 射线光子. 实验模拟的 X 射线脉冲星为典型导航脉冲星 Crab, 其轮廓模板由 RXTE 卫星空间观测数据处理获得, 调制的脉冲周期为 33.4 ms. 图 4 为归一化 Crab 脉冲星标准轮廓, 横线以上部分为脉冲部分光子计数 N_{Pulse} , 为脉冲星辐射的 X 射线脉冲光子, 也是脉冲星导航中轮廓重构中的主要信息源, 红线以下部分为非脉冲部分光子计数 $N_{\text{non-Pulse}}$, 一般认为来自脉冲星星云和其他空间背景辐射. 定义背景噪声强度为脉冲部分光子数与非脉冲光子数的比值 $B = N_{\text{non-Pulse}} / N_{\text{Pulse}}$, 表示加载背景噪声相对强度 (无量纲). MCP 探测器接收离散的 X 射线光子并记录其到达时间, 理想情况下使用调制的脉冲周期可恢复出最佳观测脉冲轮廓. 精确的脉冲轮廓重构对周期值精度非常敏感, 然而由于 MCP 探测器本底、电子学噪声、有限光子数及其他未知因素的影响, 脉冲星自转周期会发生变化, 需要重新进行周期搜索, 获取最佳的脉冲周期 P_B , 折叠出高信噪比的观测脉冲轮廓, 周期搜索算法采用 χ^2 量评估方法[24].

MCP 探测器的脉冲信号探测能力可用观测脉冲信号质量和最小可探测功率进行评价. 前者采用观测脉冲的相似度、信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 及脉冲到达时间 (Time of Arrival, TOA) 精度等指标描述, 后者描述了 MCP 探测器的最小探测能力, 计算公式可由光子计数模型推导建立.

根据地面测试系统的工作原理, MCP 探测器输出的光子计数率 N 为

$$N = N_{\text{pulse}} + N_{\text{non-Pulse}} + N_b \quad (1)$$

主要包括三部分: 1) X 射线脉冲光子计数 N_{Pulse} ; 2) X 射线非脉冲光子计数 $N_{\text{non-Pulse}}$, 一般模拟脉冲星星云和空间粒子背景辐射; 3) 探测器自身引起的暗计数 N_b . 后两种光子计数统计特性呈随机白噪声.

假设 MCP 探测器几何有效面积为 A , 且有效观测时间为 t , 则三类光子流量密度分别为

$$\begin{cases} f_{\text{Pulse}} = N_{\text{Pulse}} / (A \cdot t) \\ f_{\text{non-Pulse}} = N_{\text{non-Pulse}} / (A \cdot t) \\ f_b = N_b / (A \cdot t) \end{cases} \quad (2)$$

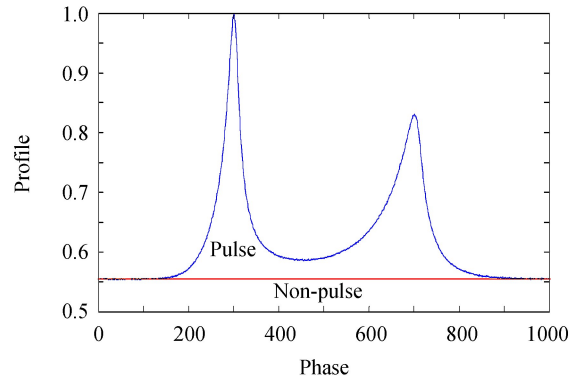


图4 加载的归一化 Crab 脉冲星标准轮廓

Fig.4 Normalized standard profile of Crab pulsar

式中, $A=20 \text{ cm}^2$, $t=10\ 000 \text{ s}$. 观测信号的 SNR 通常表示为信号源脉冲光子计数与信号观测误差 (σ_{noise}) 之比, 即

$$\text{SNR} = \frac{N_{\text{Pulse}}}{\sigma_{\text{noise}}} = \frac{N_{\text{Pulse}}}{\sqrt{(N_{\text{b}} + N_{\text{non-Pulse}}) + N_{\text{Pulse}}}} = \frac{f_{\text{Pulse}}}{\sqrt{(f_{\text{b}} + f_{\text{non-Pulse}}) + f_{\text{Pulse}}}} \cdot \sqrt{A \cdot t} \Big|_{A=20} \quad (3)$$

式(3)也可分析在脉冲模式下 MCP 探测器输出观测脉冲信号的 SNR 随时间的变化.

探测器的最小可探测功率 P_{min} , 也称为等效噪音功率 (Noise Equivalent Power, NEP), 定义为单位时间 (1 s) 单位面积 (1 cm^2) X 射线探测器获得脉冲信号 SNR 为 1 时入射 X 射线的光功率, 即入射的 X 射线脉冲光子计数. 最小可探测功率与入射 X 射线光子能量有关, 本文取特征能谱处光子能量, 即

$$P_{\text{min}} = P(t=1\text{s}) \Big|_{\text{SNR}=1, A=1 \text{ cm}^2} = h\nu \cdot f_{\text{Pulse}} / \eta = 4.5 \times 10^3 \times 1.602 \times 10^{-19} f_{\text{Pulse}} / \eta \quad (4)$$

式中, $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数, ν 为 X 射线光子频率, 实验中 Ti 靶特征谱 4.5 keV 对应的能量为 $7.2 \times 10^{-16} \text{ J}$, η 为探测效率, MCP 探测器在 4.5 keV 能量处探测效率约为 9.15%. 将 $\text{SNR}=1$ 代入式(3)中, 保留合理项, 得

$$f_{\text{Pulse}} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(f_{\text{b}} + f_{\text{non-Pulse}})}}{2} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 简化得

$$P_{\text{min}} \approx 4 \times 10^{-15} [1 + \sqrt{1 + 4 \cdot (f_{\text{b}} + f_{\text{non-Pulse}})}] \text{ W} \quad (6)$$

式中, W 为功率单位瓦. 可见, MCP 探测器在 4.5 keV 能量处存在最小可探测截止功率, 没有噪声时, 最小可探测截止功率 $P_{\text{min}} \approx 8 \times 10^{-15} \text{ W}$. X 射线探测器本底水平与运行环境温度及输出电压阈值等密切相关, MCP 探测器本底较强, 其本底流量密度 $f_{\text{b}} \approx 0.3 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$, 那么 MCP 探测器的最小可探测截止功率为 $P_{\text{min}} \approx 1 \times 10^{-14} \text{ W}$. 由式(3)和(6)可知, 确定 N_{Pulse} 和 $(N_{\text{non-Pulse}} + N_{\text{b}})$ 是关键. 星云辐射、空间背景噪声和探测器本底噪声均呈现随机分布, 无法在 X 射线光子到达时间系列中分离. 需要对光子到达时刻数据进行周期搜索重构观测脉冲轮廓, 先估计脉冲部分光子数 N_{Pulse} , 然后根据总光子数 N 得到非脉冲光子数 $N_{\text{non-Pulse}} + N_{\text{b}}$.

观测脉冲轮廓与加载标准脉冲轮廓的相似度计算公式为

$$R \equiv \max\{R(\tau) \mid \tau\} \quad (7)$$

式中, $R(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} p(t) \cdot f(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} p^2(t) dt \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt}}$, $p(t)$ 为标准的脉冲轮廓, 见图 4, $f(t)$ 为采集脉冲轮廓, 计算过程

中将观测脉冲轮廓扣除非脉冲部分并进行归一化处理. 当 $f(t)$ 与 $p(t)$ 完全一致时, 相似度最大 $R=1$.

观测脉冲 TOA 精度 (σ_{TOA}) 可通过脉冲轮廓特征进行估计, 表征基于单次观测的脉冲到达时间的分辨率, σ_{TOA} 表达式为

$$\sigma_{\text{TOA}} = \text{FWHM} / \text{SNR} \quad (8)$$

式中, FWHM 为观测轮廓的脉冲半带宽, Crab 脉冲星的 FWHM 约占整个周期的 9.1%.

2 实验结果与分析

利用地面测试系统对 MCP 探测器开展了两类实验, 评估 MCP 探测器在不同辐射流量和不同背景噪声强度下 X 射线脉冲信号获取与恢复能力. 第一类实验固定背景噪声强度 $B=1$, 通过改变栅控 X 射线球管电流 I 来调整 X 射线辐射强度, 共开展 5 组不同辐射流量的实验, 对应的 I 分别为 $65 \mu\text{A}$ 、 $50 \mu\text{A}$ 、 $25 \mu\text{A}$ 、 $5 \mu\text{A}$ 、 $1 \mu\text{A}$. 第二类实验固定辐射光子流量 ($I = 25 \mu\text{A}$), 通过调整加载的脉冲轮廓模板, 改变背景噪声强度 B , 共开展了 3 组实验, 对应的背景噪声强度 B 分别为 4、8、16. 每组实验观测时间为 10 000 s, 脉冲星模拟源加载 Crab 脉冲星轮廓模板均归一化, 整个实验耗时一周.

MCP 探测器放置在距 X 射线脉冲星模拟源 80 cm 处, 真空腔室真空度保持在 10^{-4} Pa , 测试环境温度为 20°C .

2.1 MCP 探测器脉冲信号探测能力

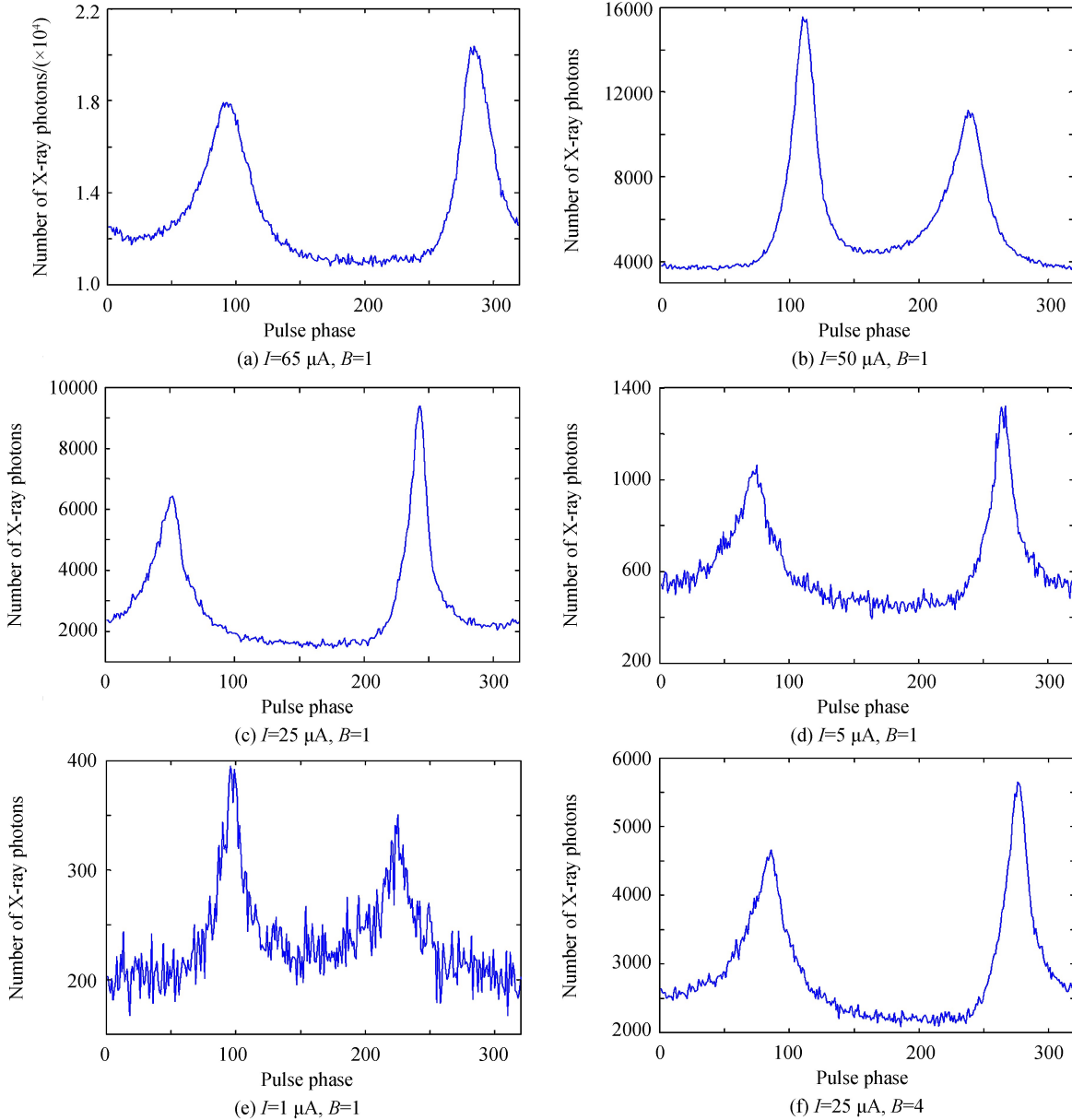
严格按照实验技术要求, 共开展了 8 组实验, MCP 探测器收集了不同辐射流量和不同背景噪声强度下

光子到达时刻数据.采用第二节描述的探测能力评估方法,对每组观测数据开展了周期搜索,使用最佳周期值进行光子折叠,每个周期分成 340 个 Bins,得到观测脉冲轮廓(见图 5),脉冲轮廓都是归算到每组的第一个 X 射线光子到达时刻处(即初始脉冲相位),也导致 8 组观测脉冲轮廓的起始相位不一致.统计了脉冲与非脉冲部分流量,计算了观测脉冲的 SNR、相似度 R 及观测精度 σ_{TOA} ,分析了 MCP 探测器的最小可探测功率 P_{min} ,相关结果见表 1.

表 1 表征 MCP 探测器脉冲信号探测能力的参数值

Table 1 Parameter values of MCP detector which reflect the pulse signal detection capability

$I/\mu\text{A}$	B	N /ph	f /($\text{ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	f_{Pulse} /($\text{ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$f_{\text{b}} + f_{\text{non-Pulse}}$ /($\text{ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	P_{B} /Hz	SNR	P_{min} /($\times 10^{-15} \text{W}$)	R /%	σ_{TOA} / μs
65	1	4 209 261	21.05	3.4	17.65	29.940 372 099 8	331.79	37.85	95.44	14.72
50	1	1 826 109	9.13	3.16	5.97	29.940 438 772 7	467.20	23.95	98.72	6.70
25	1	903 345	4.52	1.96	2.55	29.940 417 899 5	413.27	17.39	99.08	5.62
5	1	198 937	0.99	0.26	0.73	29.940 414 186 6	117.17	11.92	95.12	13.12
1	1	75 481	0.38	0.05	0.33	29.940 393 106 5	35.73	10.09	88.38	51.53
25	4	922 084	4.61	1.08	3.53	29.940 390 312 2	225.80	19.55	96.84	7.43
25	8	947 729	4.74	0.62	4.12	29.940 391 731 9	126.70	20.72	93.72	19.78
25	16	913 485	4.57	0.31	4.26	29.940 375 742 2	64.89	20.99	89.72	29.24



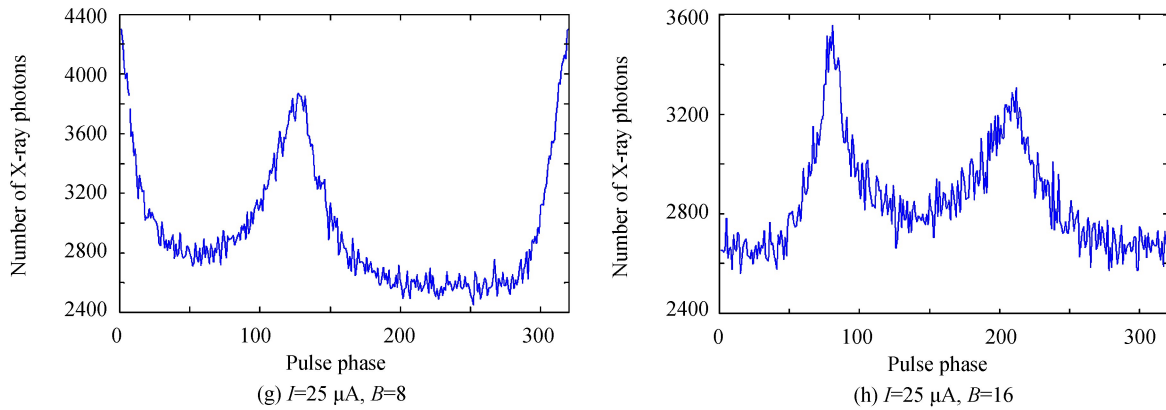


图5 8组实验得到观测脉冲轮廓

Fig.5 Observed pulse profile from 8 experiments

由表1和图5可知,MCP探测器具备较强的X射线脉冲信号采集与处理能力,在较弱脉冲光子流量和较强背景噪声强度下皆能恢复出观测脉冲轮廓,具体结论为:

1)面积 20 cm^2 的MCP探测器在 $10\ 000\text{ s}$ 内能够恢复出最弱光子辐射流量为 $0.05\text{ ph/cm}^2/\text{s}$ 的观测脉冲信号,见图5(e),轮廓信噪比SNR达到35.73、相似度 R 为88.38%,脉冲到达时间精度 σ_{TOA} 为 $51.53\ \mu\text{s}$.对于高背景噪声信号也具有较好的脉冲特性,在背景噪声 $B=16$,即背景噪声强度为脉冲信号强度16倍时,恢复出观测脉冲轮廓的SNR为64.89、 R 为89.72%、 σ_{TOA} 为 $29.24\ \mu\text{s}$,故MCP探测器能够实现对Crab、B1509等典型导航脉冲星的空间观测.如果集成增大MCP探测器面积,延长观测时间,可进一步提高脉冲信号探测能力;

2)X射线脉冲星模拟源辐射光子强度与栅控X射线球管的控制电流强度有关,电流强度 I 越强,MCP探测器接收的X射线光子数 N 越多.脉冲光子数与电流强度 I 呈线性关系,但与背景噪声强度 B 相关性较小.当脉冲信号较弱时($I=5\ \mu\text{A}$ 、 $1\ \mu\text{A}$),MCP探测器本底噪声影响明显,可见当MCP探测器空间观测微弱脉冲星时,本底噪声是个重要的误差源.需要说明的是,实验中X射线脉冲星模拟源($I=65\ \mu\text{A}$)辐射流量稳定性发生变化,可能与加载电流过大导致系统温控失常等因素有关,辐射流量的不稳定会给MCP探测器脉冲性能评估引入未知因素,本文不再分析此组数据处理结果;

3)基于观测数据搜索出最佳频率,8组频率互差 10^{-5} Hz 量级,与加载的频率真值 $29.940\ 119\ 760\ 479\text{ Hz}$ (周期为 33.4 ms)存在约 10^{-4} Hz 的差异.脉冲周期搜索精度影响因素较多,包括X射线脉冲星模拟源的稳定性、样本统计量及搜索算法精度等,其影响机制需进一步实验分析,下一步可通过实现脉冲星模拟源与探测器时间系统高精度同步来提升周期搜索精度;

4)观测脉冲轮廓信噪比SNR随着X射线脉冲星模拟源电流强度 I 增加而提高,随背景噪声强度 B 增加而减小,但非线性变化.MCP探测器的最小可探测功率 P_{min} 与电流强度 I 相关,但与背景噪声强度 B 无关,若MCP探测器接收低流量脉冲信号时(如 $I=1\ \mu\text{A}$),MCP探测器的 P_{min} 接近于其极值 $1\times 10^{-14}\text{ W}$.观测脉冲轮廓的信噪比SNR基本上随模拟源电流强度 I 增大而增大,随背景噪声强度 B 增大而减小,在较强光子流量和较弱的背景噪声情况下,观测脉冲轮廓相似度 R 都优于90%,然而当弱光子流量($I=1\ \mu\text{A}$)和强背景噪声($B=16$)时,观测脉冲轮廓的相似度 R 都小于90%.脉冲到达时刻精度 σ_{TOA} ,用来描述观测脉冲轮廓的精度,与脉冲轮廓信噪比SNR成反比. σ_{TOA} 精度随着 I 增大而改善,随 B 增大而降低,面积 20 cm^2 的MCP探测器在弱流量($I=1\ \mu\text{A}$)或强背景($B=16$)的脉冲信号照射下,观测 $10\ 000\text{ s}$ 获得的观测脉冲信号精度 σ_{TOA} 都优于 $100\ \mu\text{s}$.

2.2 MCP探测器脉冲信号探测能力时变特性

MCP探测器脉冲信号探测能力随累积观测时间增加而变化,接下来对模拟源电流强度 $I=25\ \mu\text{A}$ 及背景噪声强度 $B=1$ 时的 $10\ 000\text{ s}$ 观测数据进行分析,分析了周期搜索值,信噪比SNR,相似度 R 及观测精度 σ_{TOA} 随时间的变化.

在 $I=25\ \mu\text{A}$ 、 $B=1$ 的实验条件下,MCP探测器 $10\ 000\text{ s}$ 内共收集到 $903\ 345$ 个X射线光子,搜索得到

最佳频率为 29.940 417 899 5 Hz, 折叠观测脉冲轮廓见图 5(c). 统计了每 100 s 光子数的分布, 见图 6(a), 均值(mean)为 9 033.4, 标准方差(standard deviation, std)为 108.4, 最大值为 9 274, 最小值为 8 743, 百秒光子数均匀性优于 97%. 使用最佳频率重构了 10 s、100 s、1 000 s 脉冲观测轮廓(光子数分别为 834、8743、88 833), 分别见图 6(b)~(d). 可见, 随着观测时间延长, 收集光子数增加, 观测脉冲轮廓信噪比提高, Crab 脉冲星双高斯主峰轮廓特征更加清晰.

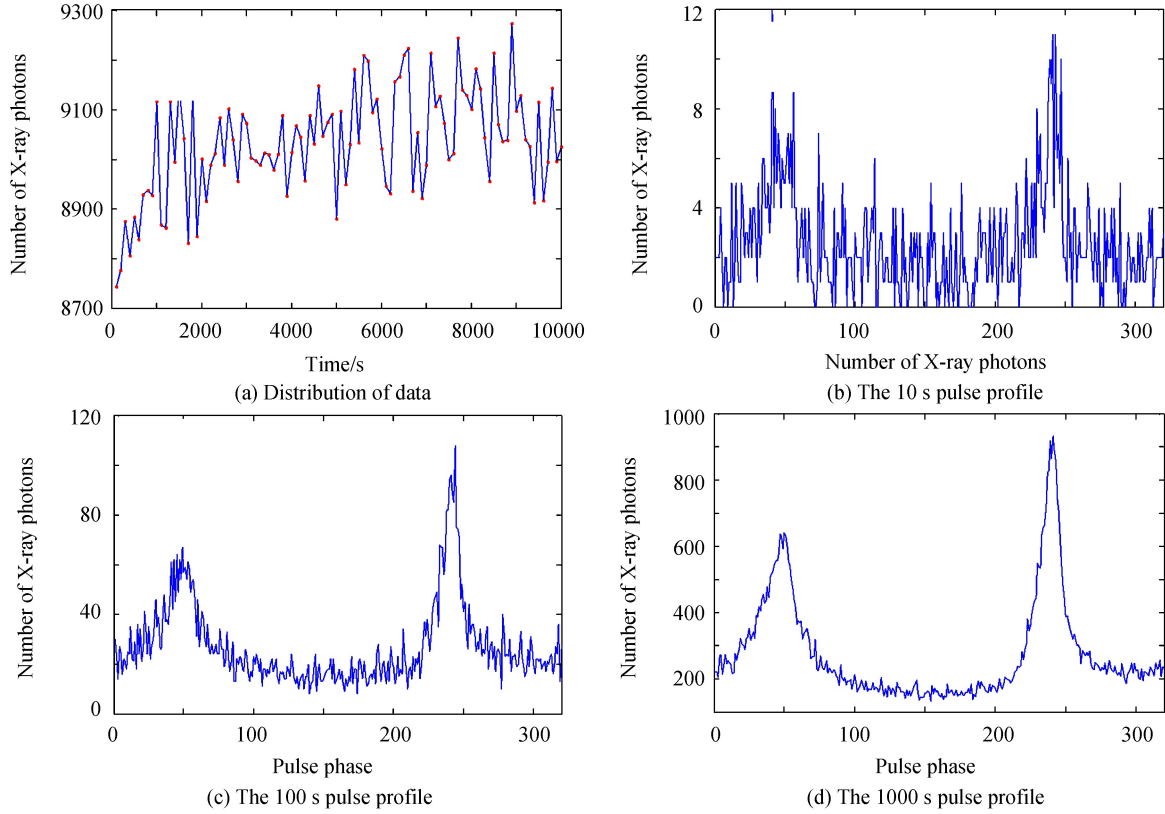


图 6 光子流量的稳定性和不同时间的观测轮廓

Fig.6 X-ray photon flux stability and observed pulse profiles from different time

为了分析 MCP 探测器不同观测时间脉冲信号探测能力, 从 10 000 s 的原始观测数据 ($I=25 \mu\text{A}$, $B=1$) 中截取了 30 段数据, 时间从 10 s 到 10 000 s 非等间隔递增, 每段数据的观测时间和光子数见表 2.

表 2 每段数据的观测时间及光子数

Table 2 Observational time and photon number of each piece of data

Time/s	Number	Time/s	Number	Time/s	Number
10	834	200	17 519	3 000	268 921
20	1 740	300	26 394	3 600	322 911
30	2 604	400	35 200	4 000	358 949
40	3 451	500	44 084	5 000	449 379
50	4 405	600	52 923	6 000	540 314
60	5 283	700	61 852	7 000	630 848
70	6 151	800	70 789	7 200	649 169
80	7 025	900	79 717	8 000	721 995
90	7 888	1 000	88 833	9 000	813 047
100	8 743	2 000	178 673	10 000	903 345

基于 30 段观测数据, 进行脉冲周期搜索(用频率表示), 见图 7(a), 构建了不同时间的观测脉冲轮廓, 分析了观测脉冲轮廓的信噪比 SNR、相似度 R 及观测精度 σ_{TOA} , 分别见图 7(b)~(d).

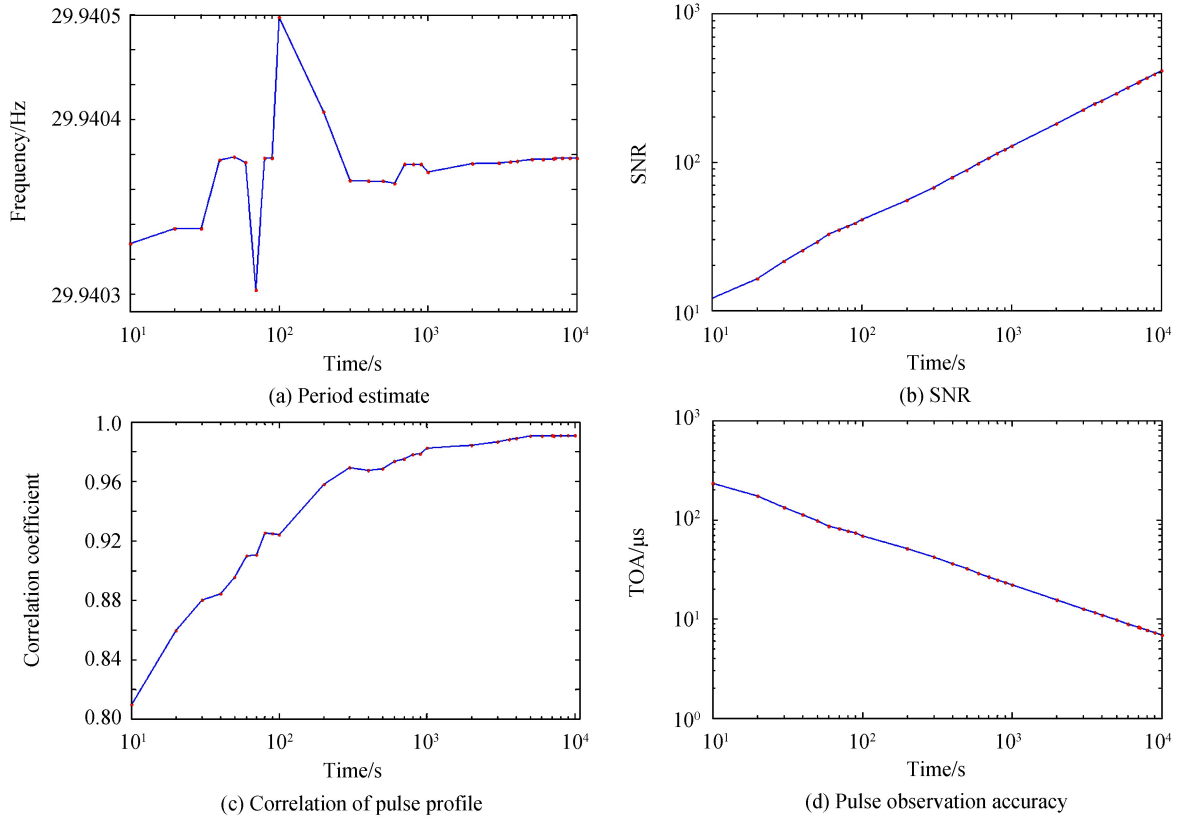


图 7 脉冲信号探测能力表征参数随观测时间变化

Fig.7 Parameters of pulse signal detection capability change with the different observation time

随着观测时间的增加,收集的光子数增加,周期搜索值趋于稳定.周期搜索精度与样本光子数呈负幂指数关系,且受到本底与背景噪声影响.基于有限光子数搜索出来的周期值可靠性较差,光子数量越少,周期搜索值精度越低.

MCP 探测器脉冲观测能力随着观测时间的增加而提高,观测脉冲轮廓更加光滑,观测脉冲轮廓信噪比 SNR、TOA 观测精度也线性提高,脉冲轮廓相似度 R 从 80.98% 提高到 99% 并趋于稳定.当 X 射线脉冲星模拟源的脉冲光子流量为 $1.96 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ 、非脉冲光子流量约 $2.3 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ 时,面积为 20 cm^2 的 MCP 探测器在 10 s 观测时间内获得观测脉冲轮廓信噪比约 12.149,脉冲 TOA 精度约 $233 \mu\text{s}$.当 X 射线源流量较强时,随着观测时间和探测器面积增加,脉冲信噪比 SNR 与 TOA 精度可进一步提高.

处理低流量 ($I=1 \mu\text{A}, B=1$) 和高背景噪声 ($I=25 \mu\text{A}, B=16$) 的情况,基本规律相同,随着观测时间增加,周期搜索精度、观测脉冲轮廓的信噪比、相似度和 TOA 精度也相应地提高.但对于低流量 X 射线脉冲信号 ($I=1 \mu\text{A}, B=1$),面积为 20 cm^2 的 MCP 探测器需要累积观测 300 s ,得到的轮廓信噪比优于 10,观测 3000 s ,脉冲 TOA 精度达到 $100 \mu\text{s}$ (对应方向误差 30 km).对于强背景脉冲信号 ($I=25 \mu\text{A}, B=16$),同样需要观测 300 s ,观测轮廓信噪比优于 10,累积观测 800 s ,脉冲 TOA 精度达到 $100 \mu\text{s}$.

3 结论

通过长时间不同 X 射线辐射流量和不同背景噪声强度的测试,MCP 探测器具备较好的 X 射线脉冲信号观测与恢复能力,能够获取较高信噪比与相似度的观测脉冲轮廓.实验中 20 cm^2 的 MCP 探测器在 10000 s 内能够恢复低流量 ($f_p=0.05 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$) 或强噪声 ($B=16$) 情况下的观测脉冲轮廓,且两者观测脉冲信号的信噪比 SNR、相似度 R 、TOA 观测精度分别为 35.73、88.38%、 $51.53 \mu\text{s}$,和 64.89、89.72%、 $29.24 \mu\text{s}$,证明了 MCP 探测器具有一定的微弱 X 射线脉冲星观测能力.在真实空间环境下 X 射线脉冲星空间探测过程中,脉冲星辐射流量很弱,即使最强的导航脉冲星 Crab,其辐射流量也仅为 $1.54 \text{ ph/cm}^2/\text{s}$,而其它脉冲星强度一般在 $10^{-2} \text{ ph/cm}^2/\text{s}$ 量级以下.受天体运动、太阳活动、地磁场扰动等影响,航天器实际运行的空间环境变化

十分复杂,背景辐射粒子种类多且随时间和空间的分布存在明显差异.空间弥散 X 射线本底的波动性也会对脉冲星导航探测带来极大的影响,本次实验中仅考虑了恒定空间背景噪声,下一步可考虑基于真实空间环境数据构建辐射模型,先从数学仿真方法评估其对 MCP 探测器的影响,然后可探索在地面测试系统上同轴加载变化的空间背景信号.

MCP 探测器的脉冲信号探测能力分析是一项复杂的系统测试工作,且需要重复实验进行统计分析.由于单次实验测试时间较长,且地面实验系统承担大量工程实验并在持续改进中,当前无法安排相同实验条件下的重复实验,本次实验结果只对 MCP 探测器脉冲性能评估提供参考,下一步可优化实验方案,缩短实验时间开展重复实验,并分析地面测试系统性能,特别是 X 射线脉冲星模拟源稳定性对 X 射线探测器性能测试结果的影响.此外,结合 MCP 探测器测试结果,融合脉冲星导航算法,评估 MCP 探测器的脉冲星导航应用性能.

致谢:感谢中国科学院西安光学精密机械研究所赵宝升研究员对实验方案的指导!

参考文献

- [1] HANSON J E. Principles of X-ray navigation[D].Dept of Aeronautics and Astronautics Stanford University, 1996.
- [2] SHEIKHS I. The use of variable celestial X-ray sources for spacecraftnavigation [D]. Department of Aerospace Engineering University of Maryland,2005.
- [3] WANG Y D, ZHENG W, SUNS M, *et al.* X-ray pulsar-based navigation system with the errors in the planetary ephemerides for earth-orbiting satellite[J].*Advances in Space Research*, 2013, **51**:2394-2404.
- [4] SHUAI Ping, ZHANG Xin-yuan, HUANG Liang-wei, *et al.*X-ray pulsar navigation test satellite science data analysis [J].*Aerospace Control and Application*, 2017, **43**(2):1-6.
帅平, 张新源, 黄良伟, 等.脉冲星导航实验卫星科学观测数据分析[J].空间控制技术与应用, 2017, **43**(2):1-6.
- [5] HUANG Liang-wei, SHUAI Ping, ZHANG Xin-yuan, *et al.* XPNA-1 satellite timing data analysis and pulse profile recovery[J].*Chinese Space Science and Technology*, 2017, **37**(3):1-10.
黄良伟, 帅平, 张新源, 等.脉冲星导航实验卫星时间数据分析与脉冲轮廓恢复[J].中国空间科学技术, 2017, **37**(3):1-10.
- [6] MITCHELL J W, WINTERNITZ L B, HASSOUNEH M A, *et al.* SEXTANT X-ray pulsar navigation demonstration: initial on-orbit result[R].NASA Technical Report, AAS 18-155, 2018, 1-12.
- [7] HU Hui-jun. Research on the X-ray photon counting detector and its key technologies for pulsar navigation[D].Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
胡慧君.用于脉冲星导航的 X 射线光子计数探测器及其关键技术研究[D].北京:中国科学院大学, 2012.
- [8] WANG Peng, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Research of the navigation accuracy for the X-ray pulsar navigation system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(20):209702.
王朋, 赵宝升, 盛立志, 等. X 射线脉冲星导航系统导航精度的研究[J].物理学报, 2012, **61**(20):209702.
- [9] TREMSIN A S, SIEGMUND O H W. Spatial distribution of electron cloud footprints from microchannel plates: measurements and modeling[J].*Review of Scientific Instruments*, 1999, **70**(8): 3282-3288.
- [10] SIEGMUND O H W, TREMSIN A S, VALLERGA J V, *et al.* High resolution cross strip anodes for photon counting detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2003, **504**: 177-181.
- [11] SAITO M, SAITO Y, ASAMURA K. Spatial charge cloud size of microchannelplates [J].*Review of Scientific Instruments*, 2007, **78**, 023302.
- [12] CHEN Bao-mei, ZHAO Bao-sheng, HU Hui-jun, *et al.*X-ray photon-counting detector based on a micro-channelplate for pulsar navigation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(6):060401.
- [13] SONG Juan, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Research on shared anode used for the large area array MCP detector[J].*Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8):0823002.
宋娟, 赵宝升, 盛立志, 等. 基于 MCP 大面阵 X 射线探测器共享阳极的研究[J].光子学报, 2014, **43**(8): 0823002.
- [14] SONG Juan, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* Selection of MCP for array X-ray pulsar navigation detector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2):402-407.
宋娟, 赵宝升, 盛立志, 等.X 射线脉冲星导航探测器的微通道板甄选[J].光学精密工程, 2015, **23**(2):402-407.
- [15] SONG Juan. Research on key technology of MCP X-ray detector used for XNAV[D].Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
宋娟. 基于脉冲星导航的 MCP 空间 X 射线探测器关键技术的研究[D].北京:中国科学院大学, 2014.
- [16] GE Ming-Yu. The X-ray emission of pulsars[D].Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
葛明玉. 脉冲星的 X 射线辐射特性研究[D].北京:中国科学院研究生院, 2012.
- [17] SHENG Li-zhi, ZHAO Bao-sheng, ZHOU Feng, *et al.* Performance of the detection system for X-ray pulsar based navigation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9):1071-1076.

- 盛立志,赵宝升,周峰,等.X 射线脉冲星导航探测器性能研究[J].光子学报,2013,**42**(9):1071-1076.
- [18] 盛立志.X 射线脉冲星信号模拟源及探测器关键技术研究[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [19] HU Hui-jun, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* X-rayphoton counting detector for x-ray pulsar-based navigation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012,**61**(1): 019701.
胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 等.用于脉冲星导航的 X 射线光子计数探测器研究[J].物理学报,2012,**61**(1): 019701.
- [20] SHENG L Z, ZHAO B S, HU H J, *et al.* Temporal resolution of X-ray detector for pulsar navigation[C]. SPIE, 2011: 81961C.
- [21] HU Hui-jun, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi. A simulation experiment system for X-ray pulsar based navigation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011,**60**(2): 029701.
胡慧君, 赵宝升, 盛立志.基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统研究[J].物理学报,2011,**60**(2): 029701.
- [22] ZHOU Feng, WU Guang-min, ZHAO Bao-sheng, *et al.* An analog modulated simulation source for X-ray pulsar-based navigation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013,**62**(11):119701.
周峰, 吴光敏, 赵宝升, 等.基于 X 射线脉冲星导航的模拟调制仿真源研究[J].物理学报,2013,**62**(11):119701.
- [23] SHENG Li-zhi, ZHAO Bao-sheng, WU Jian-jun, *et al.* Research of X-ray pulsar navigation simulation source[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013,**62**(12):129702.
盛立志, 赵宝升, 吴建军, 等.X 射线脉冲星导航系统模拟光源的研究[J].物理学报,2013,**62**(12):129702.
- [24] ZHOU Qing-yong, JI Jian-feng, REN Hong-fei. Timing equation in X-ray pulsar autonomous navigation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013,**62**(13):139701.
周庆勇, 姬剑锋, 任红飞.X 射线脉冲星自主导航的观测方程[J]. 物理学报, 2013,**62**(13):139701.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41304006, 41374042, 41374003), State Key Laboratory of Geo-information Engineering Open Research Foundation (No. SKLGIE2018-ZZ-3)

引用格式: ZHOU Qing-yong, SHENG Li-zhi, WEI Zi-qing, *et al.* Experimental Analysis of Pulse Signal Detection Capability of the MCP X-ray Detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9):0904002

周庆勇, 盛立志, 魏子卿, 等.微通道板型 X 射线探测器的脉冲信号探测能力实验分析[J].光子学报, 2018, **47**(9):0904002