

引用格式: ZHOU Qing-yong, WEI Zi-qing, JIANG Kun, *et al.* Research on the Test and Calibration Method of a Focusing X-ray Detector for Pulsar Navigation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6):0604001

周庆勇, 魏子卿, 姜坤, 等. 面向脉冲星导航的聚焦型 X 射线探测器测试标定方法研究[J]. 光子学报, 2020, 49(6):0604001

# 面向脉冲星导航的聚焦型 X 射线探测器 测试标定方法研究

周庆勇<sup>1,2,3</sup>, 魏子卿<sup>2,3</sup>, 姜坤<sup>4</sup>, 刘思伟<sup>2,3</sup>, 郑伟<sup>5</sup>, 史钰锋<sup>6</sup>, 王奕迪<sup>5</sup>,  
杨彦佶<sup>7</sup>, 胡慧君<sup>6</sup>, 金东东<sup>6</sup>, 宋娟<sup>6</sup>, 孙鹏飞<sup>8</sup>, 宋昊磊<sup>2,3</sup>

(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 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

(5 国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073)

(6 山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264003)

(7 中科院高能物理研究所, 北京 100049)

(8 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

**摘 要:**通过脉冲星辐射信号特征研究和空间观测需求分析,提出了一种面向导航应用的 X 射线探测器测试方法.首先推导了 X 射线光子欠探测概率公式,分析了不同星源流量及不同探测器时间分辨率下对光子探测能力的影响.通过数值模拟方法建立了脉冲到达时间与脉冲轮廓相似度的关系.处理了我国硬 X 射线调制望远镜的 Crab 脉冲星观测数据,研究了不同能段脉冲轮廓差异.其次,系统地研究了面向导航应用的 X 射线探测器测试及处理方法,并利用地面测试系统完成了一款自主研发的聚焦型 X 射线探测器测试工作.通过数据分析得到,聚焦型探测器本底噪声为  $3.63 \times 10^{-5}$  ph/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),工作能区为 0.2~22.7 keV,时间分辨率为 4.17  $\mu\text{s}$ ,空间响应约为  $5'$ ,能量非线性为 0.52%,能量分辨率优于 200 eV@5.7 keV,典型探测效率为 39.18%@4.51 keV.聚焦型 X 射线探测器在弱脉冲信号及强背景噪声下,均能还原出 Crab 脉冲星脉冲轮廓,在 2 400 s 内能够探测到辐射流量弱于背景噪声 10 倍的脉冲信号.结果表明,该款聚焦型探测器性能优秀,能够满足导航脉冲星(如 PSR B1509)的空间观测需求,也验证了测试方法的可行性.

**关键词:**X 射线光学;脉冲星导航;性能标定;聚焦型探测器;能量分辨率;探测效率;时间分辨率;脉冲到达时间

中图分类号:TL816+.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204906.0604001

## Research on the Test and Calibration Method of a Focusing X-ray Detector for Pulsar Navigation

ZHOU Qing-yong<sup>1,2,3</sup>, WEI Zi-qing<sup>2,3</sup>, JIANG Kun<sup>4</sup>, LIU Si-wei<sup>2,3</sup>, ZHENG Wei<sup>5</sup>,  
SHI Yu-feng<sup>6</sup>, WANG Yi-di<sup>5</sup>, YANG Yan-ji<sup>7</sup>, HU Hui-jun<sup>6</sup>, JIN Dong-dong<sup>6</sup>, SONG Juan<sup>6</sup>,  
SUN Peng-fei<sup>8</sup>, SONG Hao-lei<sup>2,3</sup>

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

基金项目:国家自然科学基金(No. 41574013),地理信息工程国家重点实验室开放研究基金(No.SKLGIE2018-ZZ-3)

第一作者:周庆勇(1986-),男,助理研究员,主要研究方向为 X 射线脉冲星导航技术. Email:zjlzqy1986@163.com

通讯作者:刘思伟(1962-),男,研究员,主要研究方向为惯性测量与脉冲星导航技术. Email:lsww79@163.com

收稿日期:2019-12-11;录用日期:2020-03-31

(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 Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

(5 College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(6 Shangdong Aerospace Electro-Technology Institute, Yantai, Shandong 264003, China)

(7 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(8 College of Geological Engineering and Surveying, Changan University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** A testing method for X-ray detector is proposed through the study of the characteristics of pulsar radiation signals and the analysis of space observation requirements. Firstly, based on the photon radiation model, the probability formula of X-ray photon under detection is deduced, and the influences of different source flux and different detector time resolution on photon detection ability are analyzed. The relationship between pulse arrival time and the similarity of pulse profile is established by numerical simulations. And the observations of the crab pulsar of hard X-ray modulation telescope is processed, the pulse profile characteristics of the Crab pulsar at different energy are studied. Secondly, the testing and processing methods of X-ray detector for pulsar navigation are studied systematically, and the testing work of a self-developed focused X-ray detector is completed by using the ground testing system. The test results show that the background noise of the focused detector is  $3.63 \times 10^{-5}$  ph/( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), the working energy range is 0.2~22.7 keV, the time resolution is 4.17  $\mu\text{s}$ , and the spatial response is about  $5'$ . The energy linearity of the detector is good, the integral nonlinearity is 0.52%. The energy resolution of the detector is better than 200 eV at five characteristic energy spectra, and the best detection efficiency is 39.18% @ 4.51 keV. Under the condition of weak pulse signal and strong background noise, the detector can accurately restore the pulse profile of Crab pulsar. The signal-to-noise ratio and similarity of the pulse profile increase with the increase of pulse flow and the decrease of background noise. The detector can detect the pulse signal whose radiation flux is 10 times less than the background noise in 2 400 s. The results show that the focused detector has excellent performance and can meet the space observation requirements of navigation pulsars (eg. PSR B1509), so the feasibility of the testing method is also verified.

**Key words:** X-ray optics; Pulsar navigation; Performance calibration; Focusing detector; Energy resolution; Detection efficiency; Pulsar navigation; Pulse time of arrival

**OCIS Codes:** 040.5160; 040.7480; 040.1520

## 0 引言

X射线是波长为0.01~10 nm的电磁波,具有能量大、穿透性强等特点,由德国物理学家伦琴于1895年发现<sup>[1]</sup>.由于X射线无法穿透稠密大气层到达地球表面,故天体X射线辐射只能依靠卫星或高空气球搭载探测器进行空间观测<sup>[2-3]</sup>.近些年,X射线脉冲星导航和X射线通信成为重要研究方向,被美国国家航空航天署(National Aeronautics and Space Administration, NASA)列为“革命性概念”技术.脉冲星导航是利用遥远脉冲星辐射的高稳定软X射线脉冲信号(1~15 keV)实现航天器位置确定,具有高精度、自主性、全空域、安全性等特点<sup>[4-6]</sup>,可减少地面深空网的通讯测控负担;X射线通信具有极大的信道容量与通信带宽、强抗干扰能力,理论带宽可达40 000 Tb/s,可应用于穿透等离子体及“黑障区”的通信<sup>[1]</sup>.X射线开辟了可见光和射电波段之外探索宇宙的新窗口,拓展了人类对于宇宙的认识<sup>[2]</sup>.自20世纪60年代以来,人类发射近百台空间X射线天文望远镜,现仍有10余颗卫星正常工作<sup>[7-8]</sup>.2017年6月, NASA在国际空间站(International Space Station, ISS)上实施了“中子星内部构成研究”(Neutron Star Interior Composition Explorer, NICER)项目<sup>[9]</sup>.NICER上搭载了先进的X射线计时仪器(X-ray Timing Instrument, XTI),其性能较之前探测器有数量级的提高,并利用NICER高性能X射线探测器,同时实施了X射线通信和脉冲星导航在轨试验项目(Station Explorer for X-ray Timing and Navigation Technology, SEXTANT)<sup>[10-11]</sup>.我国空间科学观测尚处于起步阶段,近年来也取得积极进展,发射多颗X射线空间观测卫星,如HXMT与脉冲星观测试验卫星(the First X-ray Pulsar Navigation Test Satellite, XPNV-01),HXMT参与了国际上引力波事件后高能辐射对应体的观测<sup>[12]</sup>.

X 射线探测器是利用在气体、液体或固体中引起的电离效应、发光现象、化学变化进行光子探测的器件,是 X 射线科学及技术研究的基础.X 射线探测器性能优劣对整个观测平台性能影响很大,直接影响着数据分析的质量,影响着空间天体认知及应用水平.合适的探测器配置能缩小系统体积、减轻质量、提高效率,反之亦然.近些年,探测技术发展迅速,从早期气体探测器、晶体探测器、微通板型探测器,到现在的闪烁体探测器、半导体探测器,探测器响应越来越快,探测效率也得到提高<sup>[13-14]</sup>.一套完整的探测器系统包括 X 射线光学部分(也称镜头)与 X 射线传感器,也有简单地称 X 射线传感器为探测器.

当前,X 射线探测器测试研究基本针对某款或某类型 X 射线探测器中制造工艺或特定任务需求开展专门测试,从导航工程应用出发,针对脉冲星观测需求开展探测器综合测试方法研究较少.吉林大学杨彦佶、刘晓艳博士针对 HXMT 任务中电荷耦合漂移(Charge Coupled Device, CCD)型 X 射线探测器能量特性测试和标定进行研究<sup>[15-16]</sup>,西安测绘研究所周庆勇利用 Crab 脉冲星能谱标定了 XPNV-1 卫星聚焦型探测器在轨性能<sup>[17]</sup>,中科院长春光学精密机械研究所赵大春博士研究了软 X 射线掠入射光学系统设计和加工工艺<sup>[18]</sup>,盛立志博士研究团队研制了栅控 X 射线源,并基于此设备搭建了一套半物理地面仿真系统,实现了空间 X 射线观测高动态模拟<sup>[19-20]</sup>.中国空间技术研究院、国防科技大学、高能物理研究所分别搭建各自的地面测试标定装置.美国 NASA 为了完成高能天文台卫星的地面测试和定标,1977 年在马歇尔空间飞行中心建成了 500 m 长的大型 X 射线定标装置(X-ray and Cryogenic Facility, XRCF),并根据后续天文项目的需求不断升级改造 XRCF.欧洲航天局(European Space Agency, ESA)也建成了类似测试装置 PANTER.特别是,美国戈达德宇宙飞行中心为测试和验证 X 射线脉冲星导航技术,规避技术风险和测试元器件,搭建了专门的地面测试平台,命名为 Testbed<sup>[21]</sup>,对 XTI 探测器进行了详细测试分析.本文主要针对脉冲星导航中软 X 射线探测需求,以脉冲星辐射特性出发,提出了一套 X 射线探测器的测试方法.分别研究了测试方法和数据处理方法,并分析了一款自主研发的聚焦型探测器测试结果,最后总结整个测试工作,提出一些改进意见.

## 1 探测器测试方法研究

X 射线探测器的任务是最大限度地收集观测目标辐射的各类信息,包括时间、能量、位置、偏振等信息,为科学研究和工程应用提供高质量的基础数据.脉冲星导航空间试验中,X 射线探测器为航天器提供尽量多高质量观测数据,供星载计算机开展导航解算.脉冲星是一类具有强引力场、强磁场、极端强作用和弱作用的高速旋转中子星,其磁场强度  $10^9 \sim 10^{13}$  G,质量密度高达  $10^{13}$  g/cm<sup>3</sup>,其发现被称为 20 世纪 60 年代天文四大发现之一.由于脉冲星具有极其稳定的自转频率和清晰的脉冲轮廓特征<sup>[22]</sup>,观测脉冲星可构建一个高稳定性、全自主性和全宇宙性的脉冲星时,实现航天器高精度深空自主导航服务.2018 年 12 月 24 日,欧空局利用四个百米量级射电望远镜建立了一个脉冲星时间系统 PulChron,目的是改善伽利略卫星导航系统的时间基准,美国 DAPAR 也启动类似计划 XTIM.NASA 宣布通过 SEXTANT 项目两周观测数据实现近地空间优于 10 km 脉冲星导航精度<sup>[23]</sup>.可见,X 射线脉冲星观测不光有良好的科学研究前景,还有良好的工程应用价值,故 X 射线脉冲星空间观测对高性能 X 射线探测器的需求是最迫切的也是最苛刻的.下面从脉冲星辐射光子的时间和能量特性出发,开展 X 射线探测器测试方法研究.

精确测定 X 射线光子到达时间是恢复脉冲星周期和重构脉冲轮廓的关键,X 射线脉冲星辐射光子可建模如下<sup>[6]</sup>.

在任意时间间隔  $(t, s)$  内检测到  $k$  个 X 射线光子,是一个参数为  $\int_0^t \lambda(\xi) d\xi$  的泊松随机变量

$$P(N_t - N_s = k) = \frac{\left(\int_s^t \lambda(\xi) d\xi\right)^k \exp\left(-\int_s^t \lambda(\xi) d\xi\right)}{k!} \quad (1)$$

式中,流量密度函数  $\lambda(t) \geq 0$ ,主要包括 X 射线脉冲星辐射的光子以及背景噪声, $N_t$  为  $(0, t)$  时间内接收到光子数, $N_s$  为  $(0, s)$  时间内接收到光子数.

$$\lambda(t) = \lambda_b + \lambda_s h(\varphi_{\text{det}}(t)) \quad (\text{ph/s}) \quad (2)$$

式中, $h(\varphi)$  是周期脉冲轮廓, $\varphi_{\text{det}}(t)$  为光子相位, $\lambda_b$  和  $\lambda_s$  分别为有效的背景流量和脉冲星源光子流量.

每个光子的相位  $\varphi_{\text{det}}(t)$  是指相对于初始观测时刻的相位  $\varphi_0$  与累积相位之和

$$\varphi_{\text{det}}(t) = \varphi_0 + \int_{t_0}^t f_0(\tau) d\tau \quad (3)$$

式中,观测频率  $f_0(\tau)$  是脉冲星本征频率  $f_s$  与航天器视向运动导致的多普勒频移  $f_d = f_s \frac{v}{c}$  之和.假设航天器视向速度恒定,观测流量密度函数可表示为

$$\lambda(t; \varphi_0) = \lambda_b + \lambda_s h[\varphi_0 + (t - t_0)f_0] \quad (4)$$

将非重叠过程观测时间划分为很多无限小的时间间隔,其宽度都为  $\Delta t_i, i=1, 2, \dots, k$ , 这些间隔相对于  $t_i, i=1, 2, \dots, k$  是对称的.那么,到达时间  $\{t_i\}$  满足

$$P(k) = P\left[\tau_1 \in \left(t_1 - \frac{\Delta t_1}{2}, t_1 + \frac{\Delta t_1}{2}\right), \dots, \tau_k \in \left(t_k - \frac{\Delta t_k}{2}, t_k + \frac{\Delta t_k}{2}\right)\right] = e^{-\Lambda} \prod_{i=1}^k \lambda(t_i) \Delta t_i \quad (5)$$

式中,  $\Lambda(t) \triangleq \int_0^t \lambda(\xi) d\xi = E[N_t]$ , 等号左边表示每一个时间段内检测到一个光子的概率.

光子探测损失概率  $P_L$  用于描述探测器在  $T_b$  内探测到多个光子但仅识别为一个光子,从而引起的欠探测概率.其表达式为

$$P_L = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} (k-1) P(k)}{\sum_{k=1}^{\infty} k P(k)} \quad (6)$$

式(6)实质上是表示损失光子数与接收到光子数之比.

假设 X 射线探测器有效面积为  $1 \text{ m}^2$ , 光子流量从  $10^{-5} \sim 10^2 \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$  变化,时间分辨率从  $1 \text{ ns}$  到  $10 \text{ ms}$  变化.脉冲星轮廓来自于 HXMT 卫星的 Crab 脉冲星,脉冲流量为  $1.54 \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ,星云流量为脉冲流量的 10 倍,忽略空间本底噪声的影响,计算考虑流量与时间分辨率两种因素下光子探测损失概率,如图 1.

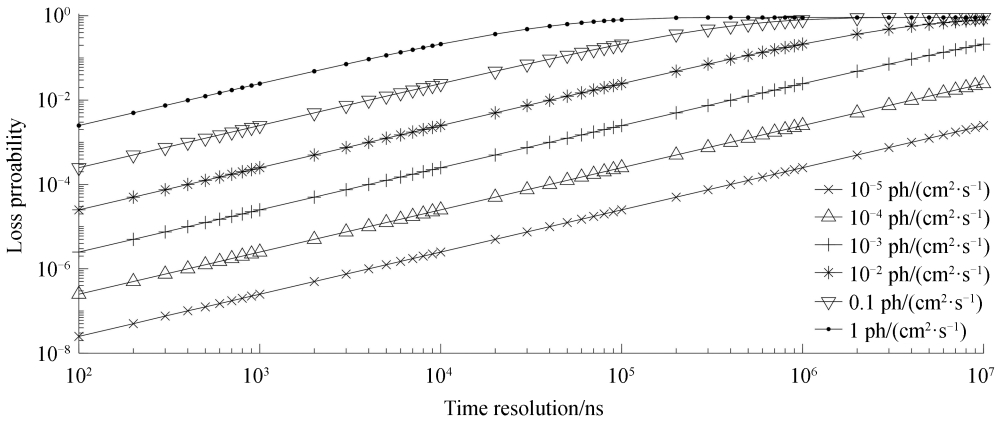


图 1 光子探测损失概率与流量、时间分辨率的关系

Fig.1 The relation between loss probability of photon detection and flow rate, time resolution

由图 1 可知,随着时间分辨率或观测流量的增大,光子探测损失概率增加.在光子流量很弱 ( $< 10^{-3} \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ) 且时间分辨率小于  $1 \mu\text{s}$  的情况下,光子探测损失率可忽略.除了 Crab 脉冲星,其他导航脉冲星光子流量都小于  $10^{-2} \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ,面积  $1 \text{ m}^2$  的 X 射线探测器时间分辨率为  $10 \mu\text{s}$  的光子损失率远小于  $1\%$ ,对于 Crab 脉冲星,光子损失率为  $7.32\%$ ,  $5 \mu\text{s}$  时,损失率为  $3.75\%$ ,  $1 \mu\text{s}$  时为  $0.76\%$ .大面阵探测器常配置多路读出电路,考虑每路读出电路对应的有效面积,因此,  $10 \mu\text{s}$  的时间分辨率能够满足高流量脉冲星的观测需求.

脉冲星离地球十分遥远,一般位于超新星遗迹中,空间角距较小,要求探测器具有良好的空间分辨率.探测器空间分辨率跟结构设计密切相关,如 Chandra 卫星、XMM-Newton 卫星上 X 射线探测器的角度分辨率分别为  $0.5'$  和  $14'$ ,但沉重结构导致面质比分别为  $1.85 \times 10^4, 2.3 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^2 @ 1 \text{ keV}$ ,难于适用于脉冲星导航.X 射线探测器具有良好的空间分辨率,有利于限制视场,精准地收集脉冲星辐射的 X 射线光子,抑制星源



附近区域背景粒子噪声,提高脉冲信噪比。一般来说,聚焦型 X 射线探测器的空间分辨率一般要求优于  $15'$ ,而准直型 X 射线探测器要求优于  $1^\circ$ 。

脉冲星导航及脉冲星计时的基本观测量是 TOA,即观测脉冲轮廓相对于标准脉冲轮廓的相位时延。根据式(4),已知的标准脉冲轮廓可描述为

$$\lambda(t_i) = \lambda_b + \lambda_s h [(t_i - t_0) f_0] \quad (7)$$

对于观测脉冲轮廓  $\tilde{\lambda}(t_i) = \lambda(t_i; \varphi) + n(t_i)$ ,其中  $n(t_i)$  为光子折叠误差。两者时间相位差  $\varphi$  可通过  $\tilde{\lambda}(t_i)$  与  $\lambda(t_i)$  进行互相关函数值最大得到

$$\varphi = -\operatorname{argmax} R(\psi) \quad (8)$$

$$R(\psi) = \int_0^{2\pi} \lambda(t) \tilde{\lambda}(t; \psi) dt \quad (9)$$

采用数值仿真试验来分析脉冲到达时间与轮廓相似度的关系。构建一个标准轮廓,在标准轮廓上加一定的随机噪声生成观测脉冲轮廓,进行互相关计算,求取轮廓的相似度及脉冲到达时间(TOA)。为了统计准确性,每组试验重复 1 000 次,统计相似度平均值与 TOA 精度的关系。依次加载不同强度的随机噪声,重复上述试验,可得 TOA 精度与相似度的对应关系,如图 2。试验中,标准脉冲轮廓为无本底噪声的单峰正弦信号,脉冲占空比为 10%,对标准轮廓离散化,一个周期(P)分成了 1 000 个间隔(Bins)。

公里量级脉冲星导航需要脉冲 TOA 测量精度达到 100 ns。由图 2 可知,对于周期约为 33.4 ms 的

Crab 脉冲星,如果要 TOA 精度实现 100 ns,就是 TOA 精度要达到  $3 \times 10^{-6} P$ ,那么观测脉冲轮廓相似度好于 99%。而对于毫秒脉冲星,假设其周期为 5 ms,其 TOA 精度要达到  $2 \times 10^{-5} P$ ,脉冲轮廓相似度也要优于 97%。

脉冲轮廓是标识和利用脉冲星的主要信息源,然而脉冲星辐射在不同频段存在一定的差异。使用 HXMT 卫星 2017 年 9 月 1 日至 2 日期间 Crab 脉冲星观测数据来分析探测器能量分辨率需求。HXMT 是我国首颗大型空间高能天文观测平台,于 2017 年 6 月 15 日发射成功,能实现宽波段 X 射线(1~250 keV)成像巡天,并对黑洞、脉冲星等天体进行高频次定点观测,研究多波段 X 射线快速光变现象。Crab 脉冲星是 HXMT 卫星密集观测的星源,也是一颗既在射电波段又在 X 波段具有辐射的年轻脉冲星。Crab 脉冲星的星历参考澳大利亚国家望远镜中心(Australia Telescope National Facility, ATNF)脉冲星星表<sup>[24]</sup>。通过对卫星两天内所有 Crab 脉冲星观测数据的处理分析,截取其中四个能区归一化脉冲星轮廓,如图 3。

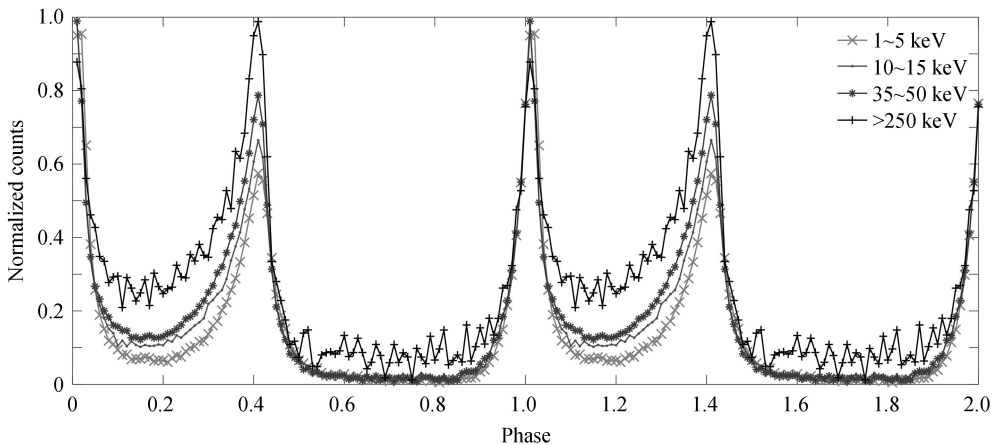


图 3 Crab 脉冲星分能段归一化脉冲轮廓

Fig.3 The normalized pulse profile of pulsar in different radiation energy spectrum

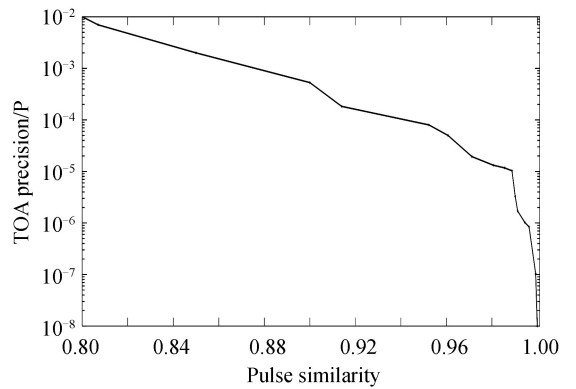


图 2 相似度与 TOA 精度关系

Fig.2 The relationship between pulse similarity and TOA precision

脉冲星一般呈幂律谱辐射,即辐射光子数随能量呈指数式衰减,能量越高接收到光子数越少.HXMT 卫星包括三个 X 射线探测器:高能 X 射线望远镜观测能区 20~250 keV,中能 X 射线望远镜观测能区 5~30 keV,低能 X 射线望远镜观测能区 1~15 keV,观测能段有所重叠.由图 3 可知,不同能区内 Crab 脉冲星轮廓形状不一样,能量越高,脉冲星的次峰比值越大,且主次峰桥区也相应地抬高.可见,导航应用的脉冲轮廓模板构建需要精细化,从而针对不同 X 射线探测器的工作能区重构其适用的脉冲轮廓模板,避免统一的脉冲轮廓模板带来的误差.

综上所述,脉冲星空间观测对 X 射线探测器的时间、能量、空间响应及脉冲星轮廓相似度都提出了相应的要求.参考国内外探测器的测试经验,结合地面测试系统性能, X 射线探测器性能的测试主要包括能量响应、空间响应、时间响应、脉冲信号还原能力四个项目.地面测试系统详细信息请参考文献[25].

## 2 测试数据处理方法研究

测试标定就是将探测器的性能参数化,是一项基础性工作,下面详细地介绍各个项目的测试过程及处理方法.能量响应测试项目主要包括本底噪声、能量分辨率、探测效率及工作能区.本底噪声是在没有外部光子照射下,探测器自身输出的干扰信号.本底噪声一方面影响测量的准确度,使谱线展宽,能量分辨率变差,另一方面降低信噪比,影响测量的灵敏度,在脉冲星导航应用中,会影响脉冲到达时间的测量精度.X 射线探测器的本底噪声主要来源于漏电流、热噪声、散粒噪声、复合噪声、闪变噪声等.

本底噪声采用单位时间单位有效面积内探测到的光子数描述,采取无 X 射线光子照射下探测器正常工作 1 000 s,统计收集的光子数.

能量分辨率与探测效率是探测器两项重要的参数.能量分辨率是指相近能量的谱线分辨开的能力, X 射线探测器的能量分辨率越高,有利于发现脉冲星辐射细微的能量变化,从而构建精细的脉冲轮廓.探测器能量分辨率的影响因素主要有 X 射线光子统计涨落、探测器及电子学系统的噪声,还有载流子的复合俘获而导致电荷损失.能量分辨率常用谱线极大值半高度处全宽度(Full Width at Half Maximum, FWHM)表示.

探测效率是指探测器在特定能量范围内接收到光子计数与实际到达光子计数的比值,反映了探测器的光子转化效率.当空间观测需要累积一定信噪比的信号时,高量化效率探测器可以缩短观测时间.探测效率采用间接测量方法,采用准直型硅漂移探测器(Silicon Drift Detector, SDD)作为参考标准.测试中,能量分辨率和探测效率合并测试,分别在 6 个单色 X 射线特征能谱点(Al(1.49 keV)、Ti(4.51 keV)、Cr(5.41 keV)、Fe(6.4 keV)、Cu(8.05 keV)、Zr(15.77 keV))处进行测试,每点测试时间为 1 000 s(其中 Al 靶 2 400 s),标准探测器观测时间为 300 s(Al 靶 800 s).需要说明的是,由于聚焦型探测器对 X 射线光平行度要求较高(0.5 mrad 左右),而地面测试系统的真空管束只有 25 m,为了保证照射高平行度 X 射线光束的需求,在探测器前方安装一个遮挡板,并开启了直径为 2 cm 的光孔,故只能对聚焦型探测器进行部分区域 X 射线光子照射.

各个特征能谱点测试完,收集观测数据,分别处理标准探测器和被测探测器的光子信息,绘制能谱图,进行特征能谱处能峰的两次迭代高斯拟合,表达式为

$$f(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (10)$$

式中,  $f(x)$  为光子能谱分布,  $x$  为能量,  $\mu$  为能峰中心值,  $\sigma$  为标准偏差,  $A$  为拟合的高斯峰面积. FWHM 与标准偏差  $\sigma$  的关系为

$$\text{FWHM} = 2\sigma \ln 4 \approx 2.355\sigma \quad (11)$$

探测效率  $e$  的计算表达式为

$$e = [N_{\text{det}} / (S_{\text{det}} \cdot T_{\text{det}})] / [(N_{\text{std}} / e_{\text{std}}) / (S_{\text{std}} \cdot T_{\text{std}})] \quad (12)$$

式中,  $N_{\text{det}}$  是有效面积  $S_{\text{det}}$  的参测 X 射线探测器在时间  $T_{\text{det}}$  内收集到光子数,  $N_{\text{std}}$  是有效面积  $S_{\text{std}}$  的标准探测器在  $T_{\text{std}}$  内收集到的光子数,  $e_{\text{std}}$  为标准探测器的效率,其参数参考 SDD 产品手册.计算过程中,  $N_{\text{det}}$ 、 $N_{\text{std}}$  分别为参测探测器和标准探测器的能量峰中心值  $3\sigma$  范围内光子数.一般情况下,探测器输出脉冲辐射正比于入射 X 射线光子的能量,由于入射粒子的能量在探测器的入射窗和死层中损失,可能导致能量线性发生细微变化.当 X 射线探测器直接输出能量值,根据特征谱线值重新估计其能量线性关系,可评估探测器中模数

转换系统的准确性。

工作能区是指探测器具有一定探测效率的能谱范围.采用栅控 X 射线源在约  $200 \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$  下进行  $300 \text{ s}$  零偏角方向测试,绘制全能段光谱,扣除电子学噪声等干扰,取能谱上下限作为工作能区。

空间响应是指探测器对于不同角度入射 X 射线光子的探测能力.空间响应测试分别在两个特征能谱处 ( $\text{Al}(1.49 \text{ keV})$ 、 $\text{Ti}(4.51 \text{ keV})$ ) 采用零偏角处左右逐步扫描方式,步进是探测器设计视场的十分之一,每个偏转角处测试  $100 \text{ s}$ .统计每个偏转角度处的光子流量密度,绘制出光子流量密度-偏转角图,进行高斯拟合,取顶点处流量的  $80\%$  对应的角度范围为空间响应值。

时间响应测试应包括光子到达时间精度测试和时间分辨率测试.由于地面测试系统暂不能调制出超短脉冲信号,无法进行光子到达时间精度的测试.时间分辨率是指探测器所能分辨的相邻光子最短时间间隔,其受电子倍增或电子空穴对漂移时间、电子学采样间隔、电子学死时间、脉冲上升时间等因素影响,其水平影响着探测器接收光子的能力.测试采取栅控 X 射线源在流量约  $200 \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$  下零偏角测试  $300 \text{ s}$ ,收集测试数据,绘制光子到达时间间隔分布图.X 射线光子到达时间间隔统计服从负指数分布,当时间间隔较小时,由于死时间或时间分辨率不够,会偏离指数分布,将偏离指数分布对应的时间间隔值定义为时间分辨率,而非最小时间间隔。

脉冲信号还原能力主要测试周期性信号还原能力,是对 X 射线探测器性能的一个综合考核,主要包括无背景噪声下不同脉冲流量、固定流量不同背景噪声情况下脉冲信号还原试验测试.两项测试均采用栅控 X 射线源,调制加载 Crab 脉冲星脉冲轮廓.第一项测试开展三项无噪声下不同辐射流量 ( $0.1 \text{ Crab}$ 、 $1 \text{ Crab}$ 、 $10 \text{ Crab}$ ) 的试验,第二项测试在固定 X 射线辐射流量 ( $1 \text{ Crab}$ ) 下同轴加载三项不同背景噪声流量 ( $0.1 \text{ Crab}$ 、 $1 \text{ Crab}$ 、 $10 \text{ Crab}$ ) 的试验,每项子试验重复  $3$  次。

脉冲信号还原能力测试的考核是以观测脉冲轮廓与加载的标准轮廓的相似度进行评判.首先使用周期搜索方法对每次观测数据搜索出最佳周期值,从而折叠出观测轮廓(扣除探测器本底).然后计算采集观测轮廓与标准轮廓的相似度,相似度计算表达式为

$$R \equiv \max\{R(\tau) \mid \tau\} \quad (13)$$

式中,  $R(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} p(t) \cdot f(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} p^2(t) dt \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f^2(t) dt}}$   $p(t)$  为标准轮廓,  $f(t)$  为观测轮廓,测试结果取三次的平均值。

### 3 聚焦型 X 射线探测器性能分析

聚焦型 X 射线探测器是一款由山东航天电子技术研究所研发的原理样机,主要包括 Wolter-I 光学系统、SDD、电子学读出系统、磁偏转器、综合控制器等组成.聚焦型 X 射线探测器采用 Wolter-I 型掠入射光学系统,基于掠入射和全反射原理将平行的 X 射线光子聚焦在较小面积探测器上,实现高达上千倍的光学增益<sup>[26]</sup>.光学系统采用  $11$  层嵌套的 Wolter-I 型掠入射光学镜头,其焦距为  $1.6 \text{ m}$ ,几何有效面积为  $228.83 \text{ cm}^2$ ,重量为  $12.942 \text{ kg}$ .磁偏转器的作用是屏蔽带电粒子,X 射线敏感器为 SDD 探测器,有效面积约为  $30 \text{ mm}^2$ .当 X 射线光子作用于 SDD 探测器时,会产生电子-空穴对,空穴被就近的阴极电极吸收,电子在电场驱动下向探测器的阳极漂移.阳极收集这些电子转换成电信号,并根据电信号幅值读出其能量,上升沿超过一定阈值会触发一个时刻,采用铷钟标记该时刻,记为光子的到达时刻.综合控制器负责信号采集、接口通信和数据传输.探头的重量为  $12.942 \text{ kg}$ ,体积为  $235 \text{ mm} \times 235 \text{ mm} \times 1655 \text{ mm}$ ,综合控制器的重量为  $2.012 \text{ kg}$ ,整机功耗为  $20.99 \text{ W}$ 。

整个测试工作持续近一个月,完成了所有项目的测试及处理,获得探测器性能参数,主要结果如下:在无 X 射线光子照射情况下,聚焦型探测器在工作温度  $13.9 \text{ }^\circ\text{C}$  下观测  $962 \text{ s}$  共收集到  $8$  个 X 射线光子,本底噪声计算为  $3.6338 \times 10^{-5} \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ,优于其设计值  $0.01 \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

聚焦型探测器的工作能区,如图 4.在工作能区测试中,栅控 X 射线源最强流量下运行了  $300 \text{ s}$ ,聚焦型探测器收集到  $267034$  个光子,剔除  $3$  个孤立电子学噪声点,工作能区为  $0.2 \sim 22.7 \text{ keV}$ ,覆盖了脉冲星导航使用频段 ( $1 \sim 15 \text{ keV}$ )。

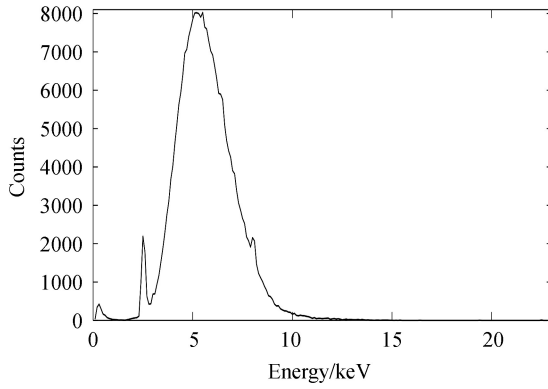


图 4 聚焦型探测器的工作能区

Fig.4 Working energy region of the focused X-ray detector

能量分辨率与探测效率是X射线探测器两项关键性的技术指标,使用单色X射线源合并测试.如图5,

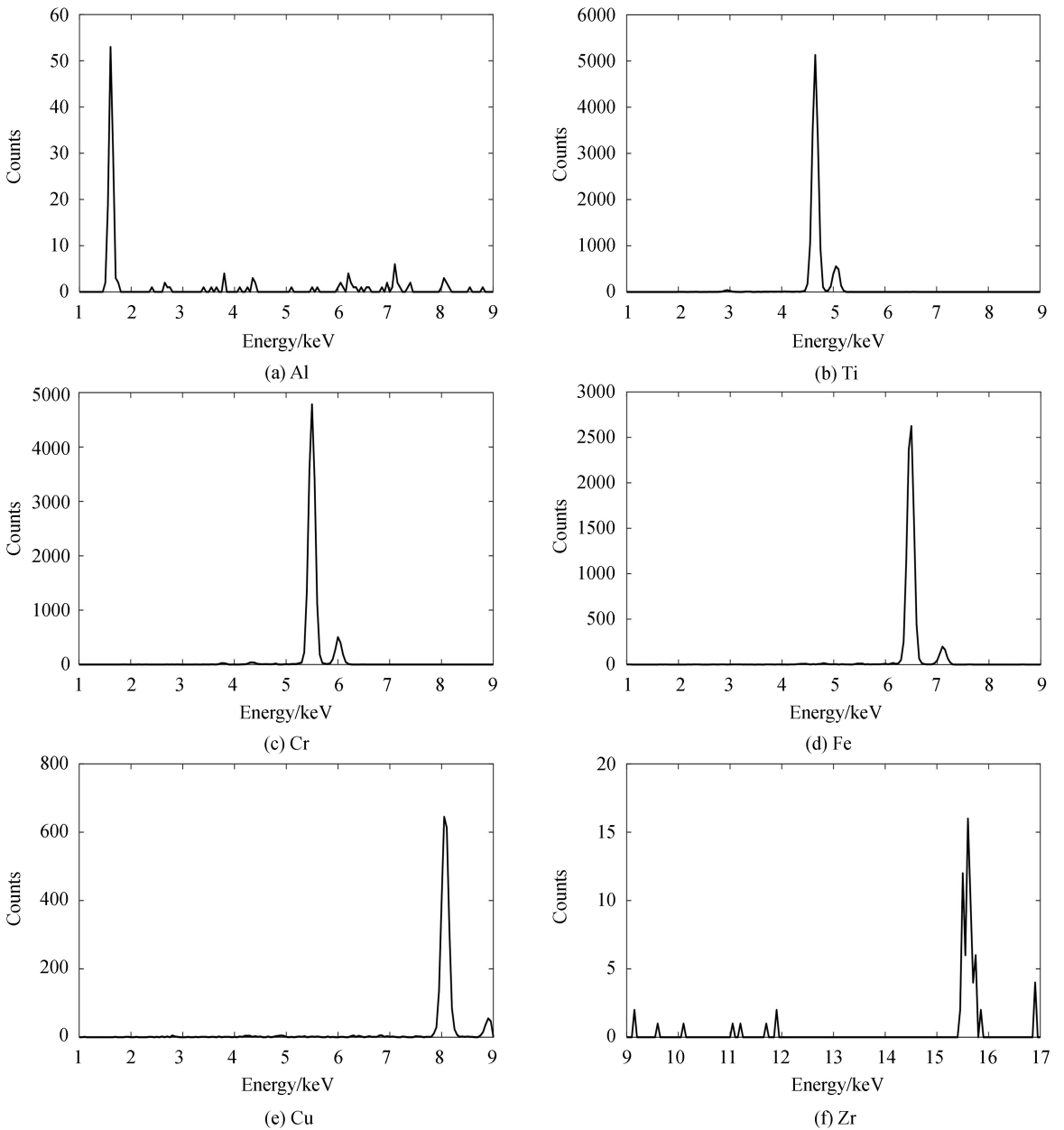


图 5 聚焦型探测器观测到 6 种靶材的特征能谱

Fig.5 The characteristic energy spectra of six targets observed by focused detector



单色 X 射线源在软 X 射线频段(1~15 keV)提供了6种不同的特征能谱点(Al(1.49 keV)、Ti(4.51 keV)、Cr(5.41 keV)、Fe(6.4 keV)、Cu(8.05 keV)、Zr(15.77 keV)).测试时系统的真空度为 0.15 pa,标准SDD探测器与聚焦型探测器放置在离单色 X 射线模拟源 25 m 处.

由于聚焦型探测器观测到 15.77 keV 谱线处的光子数很少,无法高斯拟合其特征谱处能峰,故后面不做统计分析.通过对 X 射线探测器接收到五种靶材辐射的  $k_{\alpha}$  谱线进行两次高斯拟合,拟合曲线如图 5,确定谱峰中心位及展宽大小,进而得到探测器的能量分辨率,如表 1 所示.根据谱峰中心位值( $y$ )及靶材谱线特征值( $E$ ),拟合出两者的线性关系

$$y = 1.0122(53) \times E - 0.174(28) \quad (14)$$

式中,()内数值表示系数拟合误差.计算可得,聚焦型探测器的模数转换系统的积分非线性为 0.52%,探测器能量线性较好,说明探测器系统能够正确地将采集到的模拟信号转换为数字信号,供后续的数据处理.由表 1 可知,聚焦型探测器在五个特征能谱点处能量分辨率分别为 87.79 eV@1.49 keV、128.52 eV@4.51 keV、137.99 eV@5.41 keV、142.39 eV@6.4 keV 及 154.39 eV@8.05 keV,皆优于探测器的设计值 160 eV@4.9 keV.总体上,能量分辨率随着能量增大而变差,在 1.49 keV 处能量分辨率优于 100 eV.

表 1 聚焦型探测器的能量分辨率和探测效率值

Table 1 Energy resolution and detection efficiency of focused detector

Energy	Energy resolution	Efficiency
Al(1.49 keV)	87.79 eV	13.36%
Ti(4.51 keV)	128.52 eV	39.18%
Cr(5.41 keV)	137.99 eV	33.22%
Fe(6.4 keV)	142.39 eV	12.08%
Cu(8.05 keV)	154.39 eV	2.25%
Zr(15.77 keV)	-	-

分别统计两款 X 射线探测器特征谱线拟合曲线范围内的光子数,根据两者有效面积及标准探测器探测效率,聚焦型探测器五个能量处探测效率为 13.36%@1.49 keV、39.18%@4.51 keV、33.22%@5.41 keV、12.08%@6.4 keV 及 2.25%@8.05 keV,如表 1.除了 Al 靶(1.49 keV)处外,探测器效率呈现能量增加探测效率降低.需要说明的是,Al 靶熔点低,当光子轰击 Al 靶会导致其温度升高,辐射流量减弱,探测效率为 13.36%.

聚焦型探测器的空间响应标称值为  $15'$ .由于 Al 靶辐射流量弱,实测中每个偏转角处测试时间延长至约 300 s,Ti 靶每处观测时间 100 s.统计每个偏转角处光子流量,可得到光子计数率与偏转角的关系,如图 6.图中负角度表示向左偏,正角度表示向右偏,左右各测试十个点,对每偏转角处光子流量进行三次样条函数平滑,拟合后值为图 6 中实线.经分析,聚焦型探测器在 1.49 keV 和 4.51 keV 处的空间响应为  $5.016'$  和  $5.496'$ ,优于  $15'$  的设计指标.尽管探测器在两个特征能量处空间响应差别很小,但图 6 中显出的空间响应图

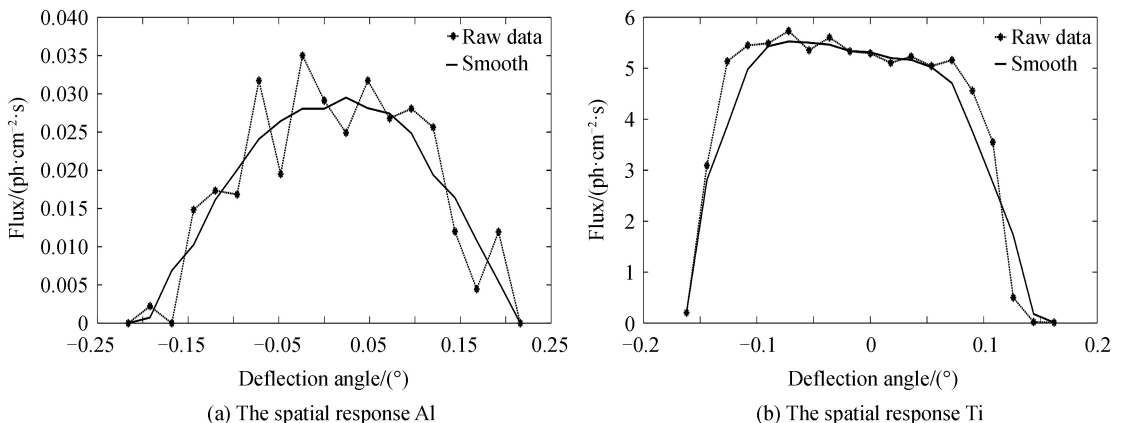


图 6 聚焦型探测器空间响应

Fig.6 The spatial response of X-ray detector

差异较大,跟 Al 靶流量低有关系,也说明探测器空间响应与探测器结构密切相关,与探测光子能量的关系较小。

时间响应测试中,栅控 X 射线源辐射 300 s,聚焦型探测器共收集到 267 034 个光子,绘制光子到达时间间隔分布图,如图 7.可见,到达时间间隔呈负指数分布,为光子事件的特征表现.由图 7 可知,聚焦型探测器的时间分辨率为  $4.17 \mu\text{s}$ ,小于  $10 \mu\text{s}$ ,约为当前发现自转最快脉冲星周期(1.4 ms)的千分之三,能满足强 X 射线源(Crab 脉冲星)的观测需求。

脉冲信号还原能力测试实际上是对探测器的一项综合性考核,包括不同流量无噪声、固定流量不同背景噪声情况下脉冲信号还原测试.首先开展了无背景噪声、脉冲信号流量分别为 0.1 Crab、1 Crab、10 Crab 的三组试验,然后开展了在脉冲信号流量 1 Crab,背景噪声光子流量为 0.1 Crab、1 Crab、10 Crab 的三组试验.每组含三次试验,试验时间随着脉冲信号减弱及背景噪声强度增加而延长,每组三次试验时间一样.聚焦型探测器成功地收集每次试验的 X 射线光子,对光子到达时刻数据进行周期搜索,折叠出脉冲轮廓,如图 8.

可见,在较弱脉冲信号(0.1 Crab)或较强背景噪声(10 Crab)情况下,均能还原出脉冲星的脉冲轮廓信号.图 8 (a)~(c)分别对应于无背景下脉冲信号流量为 0.1 Crab、1 Crab、10 Crab 的累积脉冲轮廓,可见随着脉冲流量增加,脉冲轮廓信噪提高,也说明在 2 400 s 试验条件下,聚焦型探测器可探测到流量 0.1 Crab 的脉冲星.图 8(d)~(f)分别为脉冲信号流量 1 Crab 而背景噪声流量为 0.1 Crab、1 Crab、10 Crab 的累积脉冲轮廓,可见随着背景噪声增加,脉冲轮廓信噪比减小,说明在 2 400 s 试验条件下,聚焦型探测器能够探测到辐射流量小于背景噪声 10 倍的微弱脉冲星,有利于扩大星源观测范围.同时处理了观测脉冲轮廓与标准脉冲轮廓的相似度,如表 2,相似度也是随着脉冲信号增加而提高,随着背景噪声增强而减弱,在 0.1 Crab 脉冲信号强度下,相似度保持在 80% 以上,但在强背景下,相似度较低,约 40%.在脉冲星导航中,公里量级导航精度要求

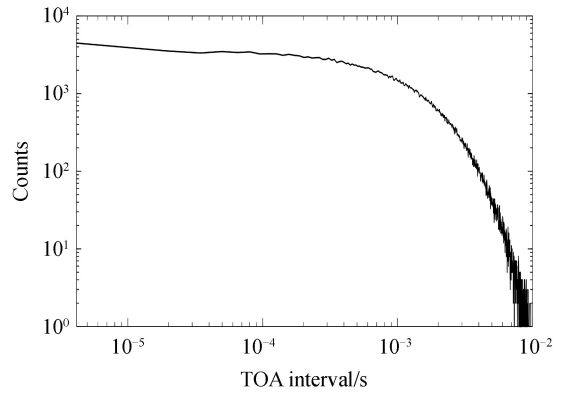
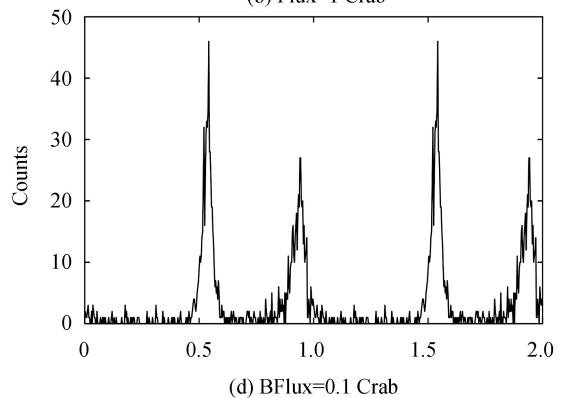
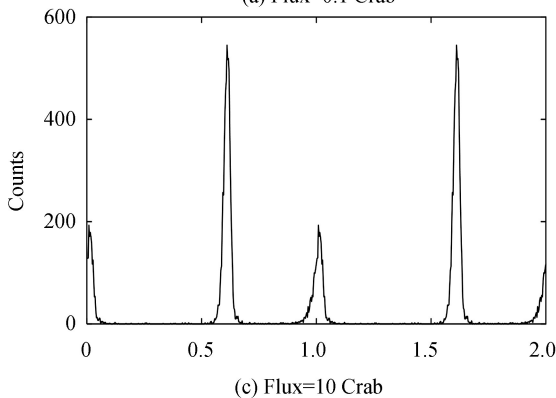
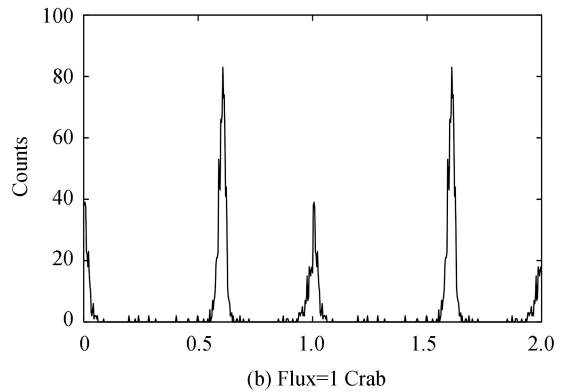
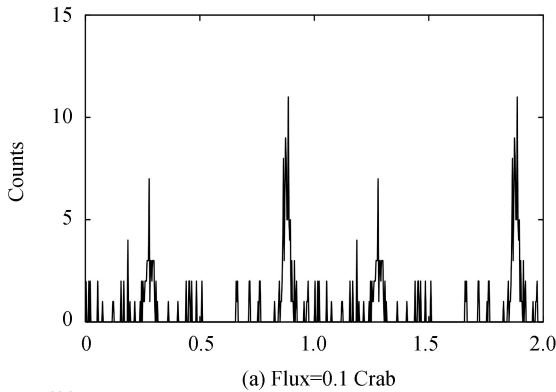


图 7 光子到达时间间隔分布图

Fig.7 Distribution of X-ray TOA intervals



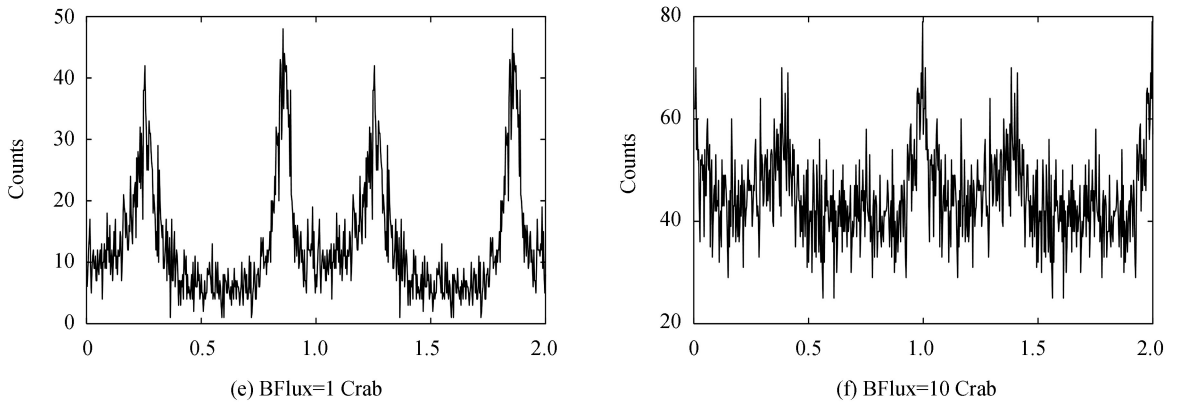


图 8 脉冲信号还原能力测试项目中恢复脉冲轮廓

Fig.8 The pulse profile recovery in pulse signal recovery capability test project

表 2 每组观测脉冲轮廓的相似度

Table 2 Similarity of the outlines of each group of observed pulses

Time/s	Background flux	Signal photon flow	Contour similarity	Time/s	Background flux	Signal photon flow	Contour similarity
1 000.09		10 Crab	0.990 0	2 400.00		10 Crab	0.408 0
1 999.74	0	10 Crab	0.987 6	2 400.27	1 Crab	10 Crab	0.408 6
999.81		10 Crab	0.991 4	2 399.35		10 Crab	0.405 1
1 600.56		1 Crab	0.981 2	1 600.19		1 Crab	0.661 6
2 1 599.40	0	1 Crab	0.977 2	1 599.79	1 Crab	1 Crab	0.671 9
1 599.84		1 Crab	0.978 3	1 599.84		1 Crab	0.674 9
2 402.32		0.1 Crab	0.770 0	1 000.00		0.1 Crab	0.892 5
3 2 393.64	0	0.1 Crab	0.824 4	999.52	1 Crab	0.1 Crab	0.901 8
2 407.50		0.1 Crab	0.806 2	998.89		0.1 Crab	0.907 4

脉冲 TOA 达到 100 ns,对于 Crab 脉冲星,要求观测脉冲轮廓相似度达到 99%,只有两次无背景强脉冲试验结果才满足要求,当然试验中脉冲星模拟源辐射的 X 射线光子只能覆盖聚焦型 X 射线探测器的直径 2 cm 的范围,收集的 X 射线光子数有限,可见,在脉冲星导航中面对流量微弱的毫秒脉冲星,提高信噪比的方式除了增大探测器面积外应尽可能抑制空间背景噪声。

## 4 结论

X 射线探测器性能测试是一项复杂的工作,涉及高能辐射、光子探测及微电子学等多学科,通过对典型空间目标脉冲星的观测需求分析出发,系统地研究了面向脉冲星导航的 X 射线探测器的测试及处理方法,以我国自主研发的一款聚焦型 X 射线探测器为例,开展性能测试实验,获得有效观测数据,验证了测试方法的可行性,掌握了该款探测器的性能参数:

1)探测器本底噪声为  $3.6338 \times 10^{-5} \text{ ph}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ,工作能区为 0.2~22.7 keV,时间分辨率为 4.17  $\mu\text{s}$ 。

2)探测器能量分辨率为 87.79 eV@1.49 keV、128.52 eV@4.51 keV、137.99 eV@5.41 keV、142.39 eV@6.4 keV 及 154.39 eV@8.05 keV,能量线性关系较好,积分非线性为 0.52%;探测效率为 13.36%@1.49 keV、39.18%@4.51 keV、33.22%@5.41 keV、12.08%@6.4 keV 及 2.25%@8.05 keV,与国外同类型探测器性能相当。

3)探测器在 1.49 keV 和 4.51 keV 处的空间响应为 5.016'和 5.496'。

4)探测器在弱脉冲信号及强背景噪声下都能准确还原出 Crab 脉冲星观测脉冲轮廓,脉冲轮廓信噪比及相似度随着脉冲流量增加、背景噪声降低而提高。试验还表明,在 2 400 s 时间内,聚焦型探测器可探测到辐射流量弱于背景噪声 10 倍的微弱脉冲星。

经过一个多月时间的测试研究,完成了聚焦型 X 射线探测器的测试工作,证实了探测器具有良好的光

子探测及脉冲信号还原能量,掌握了其性能参数,为下一步探测器性能提升提供了宝贵的数据.本次 X 射线探测器的测试工作也反映了测试方法尚存在诸多改进之处.主要包括:1)探测效率优化,应对 X 射线探测器分部分(光学镜头和 X 射线敏感器)和整体进行分别测试,检核三者探测效率的关系.此外鉴于当前平行光斑面积较小,可对于大面积 X 射线探测器采用多点测试;2)探索 X 射线探测器光子到达时间精度测试方法,光子到达时间测量精度会影响脉冲星辐射时变特性研究,也是影响脉冲星导航精度的一项关键性指标.

致谢 感谢西安光学精密机械研究所盛立志博士的指导.

## 参考文献

- [1] ZHAO Bao-sheng, SU Tong, SHENG Li-zhi, *et al.* Introduction to X-ray space communication[M]. Beijing: Science Press, 2016  
赵宝升,苏桐,盛立志,等.空间 X 射线通信概论[M].北京:科学出版社,2016.
- [2] WANG Shou-guang, ZHOU You-yuan. X-ray astrophysics[M]. Beijing: Science Press,1999  
王绥瑄,周又元.X 射线天体物理学[M].北京:科学出版社,1999.
- [3] BECKER W. Neutron stars and pulsars[M].Berlin: Springer,2008
- [4] SHEIKH S I.The use of variable celestial x-ray sources for spacecraft navigation[D]. Maryland: University of Maryland, 2005.
- [5] BECKER W, BERNHARDT M G, JESSNER A. Autonomous spacecraft navigation with pulsars[J] . *Acta Futura* , 2013, **7**: 11-28
- [6] EMADZADEH A A, SPEYER J. Navigation in Space by X-ray Pulsars[M]. London:Springer, 2011.
- [7] ZHANG Shuang-nan. Current status and future outlook of the development of China's space astronomy[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* , 2012, **42**(12): 1308-1320  
张双南.我国空间天文发展的现状和展望[J].中国科学物理学 力学天文学,2012, **42**(12): 1308-1320.
- [8] BAVDAZ M, COLLON, M, BEIJERSBERGEN M, *et al.* X-ray pore optics technologies and their application in space telescopes[J]. *X-Ray Optics and Instrumentation* ,2010, **2010**: 295095.
- [9] ARZOUMANIAN Z, GENDREAU K C, BAKER C L, *et al.*The neutron star interior composition explorer(NICER): mission definition[J]. *Space Telescopes& Instrumentation Ultraviolet to Gamma Ray* , 2014, **9144**(17): 353-356.
- [10] KEITH G. NICER: Neutron star interior composition explorer and SEXTANT[R]. GSFC :NASA Technical Report, 2012: 1-32.
- [11] RAY P S, MITCHELL J W, WINTERNITZ L M, *et al.* SEXTANT: A demonstration of X-ray pulsar-based navigation using nicer[C]. American Astronomical Society, High Energy Astrophysics Division, 2014, 14.
- [12] LI Ti-pei, XIONG Shao-lin, ZHANG Shuang-nan, *et al.* Insight-HXMT observations of the first binary neutron star merger GW170817[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* , 2018, **61**(3): 31011.
- [13] DING Hong-lin. Nuclear detector[M]. HerBin:HerBin University Press, 2010.  
丁洪林.核辐射探测器[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [14] 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): 904002.  
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): 904002.
- [15] YANG Yan-jie.The study on the performance of X-ray CCDs[D]. Changchun: Jilin university,2014.  
杨彦佶. CCD 型 X 射线探测器性能研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [16] LIU Xiao-yan. A digital CDS technique and calibration tests of CCD X-ray detector[D]. Changchun:Jilin university, 2015.  
刘晓艳. CCD X 射线探测器的数字 CDS 技术及标定实验[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [17] ZHOU Qing-yong, WEI Zi-qing, JIANG Kun, *et al.* A method of calibrating effective area of focusing X-ray detector by using normal spectrum of Crab pulsar[J]. *Acta Physica Sinica* , 2018, **67**(5): 050701.  
周庆勇,魏子卿,姜坤,等.一种聚焦型 X 射线探测器在轨性能标定方法研究[J].物理学报,2018,**67**(5): 050701.
- [18] ZHAO Da-chun. Design and fabrication technology on soft X-ray grazing incidence concentrators[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.  
赵大春. 软 X 射线掠入射集光系统设计及加工技术研究[D].长春:中国科学院大学,2016.
- [19] 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.
- [20] 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.



- [21] WINTERNITZ L M B, HASSOUNEH M A, MITCELL J W, *et al.* X-ray pulsar navigation algorithms and testbed for sextant[C]. IEEE Aerospace conference, 2015, 2015(4): 670-82
- [22] LORIMER D R, KRAMER M. Handbook of pulsar astronomy[M]. London: Cambridge University Press, 2005.
- [23] MITCHELL J W, WINTERNITZ L B, HASSOUNEH M A, *et al.* SEXTANT X-Ray pulsar navigation demonstration: initial on-orbit results[C]. 41st Annual Guidance and Control Conference of American Astronautical Society, 2018.
- [24] MANCHSTER R N, HOBBS G B, TEOH A, *et al.* The australia telescope national facility pulsar catalogue[J]. *The Astronomical Journal*, 2005, **129**(4): 1993-2006.
- [25] ZHOU Qing-yong, LIU Si-wei, JIANG Kun, *et al.* The testing work of X-ray detectors' performances for pulsar navigation[J]. *Geomatics Science and Engineering*, 2017, **37**(2): 7-13.  
周庆勇,刘思伟,姜坤,等. X 射线脉冲星导航探测器性能测试[J]. 测绘科学与工程,2017, **37**(2): 7-13.
- [26] JIN Dong-dong, LI Wen-bin, LIAN Jian, *et al.* Development of X-ray pulsar photon focusing technology[J]. *Space Electronic Technology*, 2016, **13**(2): 67-73  
金东东,李文彬,连剑,等.X 射线脉冲星光子聚焦技术发展研究[J].空间电子技术,2016,**13**(2):67-73.