

doi: 10.3788/gzxb20134209.1071

X 射线脉冲星导航探测器性能研究

盛立志^{1,2}, 赵宝升¹, 周峰¹, 王朋¹, 宋娟^{1,2}, 刘永安¹,
申景诗³, 胡慧君³, 马晓飞^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264670)

摘要:为研究用于 X 射线脉冲星导航的探测系统性能, 推导了在光子计数模式下探测系统的信噪比和最小可探测功率的关系表达式, 并搭建测量信噪比和最小可探测功率的实验装置. 测量了系统的最小可探测功率以及在不同光功率、不同累积时间和不同阈值电压条件下探测系统的信噪比. 通过对 X 射线光子到达时间的测量, 构造了 X 射线脉冲累积轮廓. 实验表明: 随着光功率和累积时间的增加, 累积脉冲轮廓的信噪比提高, 累积脉冲轮廓趋于光滑; 当阈值电压为 -150 mV 时, 信噪比为 26.3, 累积脉冲轮廓最优; 系统的最小可探测功率为 $3.5 \times 10^{-16}\text{ W}$.

关键词:单光子探测; 微通道板探测器; 最小可探测功率; 信噪比; X 射线脉冲星导航

中图分类号: TN151+.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)09-1071-6

Performance of the Detection System for X-ray Pulsar Based Navigation

SHENG Li-zhi^{1,2}, ZHAO Bao-sheng¹, ZHOU Feng¹, WANG Peng¹, SONG Juan^{1,2},
LIU Yong-an¹, SHEN Jing-shi³, HU Hui-jun³, MA Xiao-fei^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

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

(3 Shandong Aerospace Electro-technology Institute, Yantai, Shandong 264670, China)

Abstract: In order to assess the performance of detection system for X-ray pulsar navigation, the expression of the signal-to-noise ratio (SNR) and the minimum detectable power are derived in the photon counting mode of the system. Experiment system to measure the SNR and the minimum detectable power is setup. The minimum detectable power is measured; the SNRs at different integration time, optical power and threshold voltage are calculated. The X-ray pulse profile is reconstructed by measuring the time of arrival (TOA) of the X-ray photons. Experimental results show that the SNR of the pulse profile is improved and the curve of the pulse profile tends to smooth with the increasing of optical power and the integration time; the SNR is 26.3 and the pulse profile is optimal when the threshold voltage is -150 mV ; the minimum detectable power of the system is $3.5 \times 10^{-16}\text{ W}$.

Key words: Single photon detection; Micro-Channel Plate(MCP) detector; Minimum detectable power; Signal-to-Noise Ratio(SNR); X-ray pulsar navigation

0 引言

脉冲星是一种高速自转的中子星, 其辐射脉冲

信号周期极为稳定. 部分 X 射线脉冲星的自转周期变化率达到 $10^{-19} \sim 10^{-21}$, 被誉为自然界最稳定的时钟^[1-3]. X 射线脉冲星辐射周期性脉冲信号可实现

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11103069)资助

第一作者: 盛立志(1980-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为脉冲星导航 X 射线探测器. Email: Lizhi_Sheng@opt. ac. cn
导师(通讯作者): 赵宝升(1959-), 男, 研究员, 主要研究方向为单光子探测及微弱信号处理. Email: open@opt. ac. cn

收稿日期: 2013-03-01; 录用日期: 2013-04-11

地球轨道及星际空间飞行的航天器的定时、定位与定姿. X射线脉冲星导航的原理是通过长时间对脉冲星辐射的X射线脉冲进行探测,获取累积脉冲轮廓,并与标准脉冲轮廓比较得到X射线脉冲到达时间(Timing Of Arrival, TOA)^[4-7].中科院西安光机所提出并研制了基于微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)的探测器原理样机,主要对探测器的时间分辨和脉冲轮廓还原进行了测试^[8-10].由于脉冲星辐射的信号流量密度很低,所以在X射线脉冲星导航系统中探测器的最小可探测功率和累积脉冲轮廓的信噪比对整个系统导航准确度具有至关重要的影响.

本文主要针对基于微通道板MCP探测器的X射线脉冲星导航地面实验系统的累积脉冲轮廓信噪比(Signal-Noise Ratio, SNR)和最小可探测功率两个方面进行研究,推导该探测器在光子计数模式下的系统SNR和最小可探测功率的关系表达式,搭建测量SNR和最小可探测功率的实验装置,报道了SNR和最小可探测功率的实验结果.

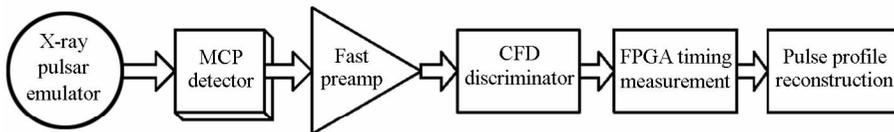


图1 X射线脉冲星导航探测器地面实验系统图

Fig. 1 Schematic of X-ray pulsar detector experiment system

为了测量X射线脉冲星导航地面实验系统的SNR和最小可探测功率,本文根据光子计数模型推导X射线脉冲星导航中SNR和最小可探测功率关系表达式.

1.2 光子计数模型

根据系统的工作原理,输入到探测器的X射线光子数密度 $P(t)$ 和探测器输出的触发脉冲计数率 $C(t)$ 可分别表示为

$$P(t) = \frac{dn_{in}}{dt}, C(t) = \frac{dn_{out}}{dt} \quad (1)$$

式中 n_{out} 为探测器输出的脉冲数, n_{in} 为输入的光子数,则探测效率可以表示为

$$DE = \eta = \frac{dn_{out}/dt}{dn_{in}/dt} = \frac{C(t)}{P(t)} \quad (2)$$

则入射X射线的光子数密度为

$$P(t) = C(t) / \eta \quad (3)$$

影响探测器输出脉冲信号计数率的原因很多,但主要包括三方面的因素^[12-13]:1)信号X射线光子引起的输出脉冲计数 N_{ph} ;2)背景光信号引起的输出脉冲计数 N_b ;3)探测器自身引起的暗计数 N_d .由于入射信号光子引起的计数 N_{ph} 在实验中无法直接测量,因此先测量出总的计数($N_{ph} + N_b + N_d$),然后

1 系统原理及理论依据

1.1 系统原理

图1为基于光子计数模式下的X射线脉冲星导航探测器地面实验系统的原理图^[11].组成部分包括:1)X射线脉冲星模拟源;2)MCP光子计数探测器;3)前端电子学处理单元,由电流灵敏前置放大器、恒比定时电路(Constant Fraction Discriminator, CFD)和阈值甄别器组成;4)基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Arrays, FPGA)的时间测量系统.基本工作原理是:X射线脉冲星模拟源发射出来4.5 keV的X射线光子被面积为 20 cm^2 的MCP探测器接收,并转换为电信号,光子事件转换为幅度 -20 mV ,脉宽为 2 ns 的电脉冲,经过电流灵敏前置放大器转化为一 300 mV 的脉冲电压信号,CFD电路在每个脉冲的恒比点处产生一个触发脉冲信号,此信号即为每个光子事件的到达时间,由FPGA时间测量系统将每个触发脉冲的时刻记录.

测量出相等时间内的背景光子和探测器暗计数($N_b + N_d$),从而可以计算出 N_{ph} .测量过程中,由于每一项都可以认为是一个独立的噪音因子,总的噪音可以表示为

$$n_{total}^2 = (N_{ph} + N_b + N_d) + (N_b + N_d) \quad (4)$$

假设测量时间为 t ,则 N_{ph} 、 N_b 和 N_d 的计数率为

$$\begin{cases} N'_{ph} = N_{ph}/t \\ N'_b = N_b/t \\ N'_d = N_d/t \end{cases} \quad (5)$$

因此SNR可以表示为

$$SNR = \frac{N_{ph}}{n_{total}} = \frac{N_{ph}}{\sqrt{N_{ph} + 2(N_b + N_d)}} = \frac{N'_{ph}\sqrt{t}}{\sqrt{N'_{ph} + 2(N'_b + N'_d)}} \quad (6)$$

而此时的最小可探测功率或等效噪音功率(Noise Equivalent Power, NEP)定义为SNR为1($SNR=1; t=1\text{s}$)时入射X射线光功率,即入射X射线所产生的脉冲计数率,所以根据式(3)得到

$$P_{NEP} = P(t) |_{SNR=1} = \frac{h\nu}{\eta} C_n(t) \quad (7)$$

此时的计数率 $C_n(t)$ 为入射 X 射线信号光子产生的输出脉冲计数率. 从表达式(6)中可以得到 SNR 为 1(SNR=1)时的入射 X 射线所产生的输出脉冲计数率为

$$C_n(t) = N'_{ph} = \frac{1 + \sqrt{1 + 8(N'_b + N'_d)}}{2} \approx \sqrt{2(N'_b + N'_d)} \quad (8)$$

所以得出在光子计数模式下的最小可探测光功率为

$$P_{min} = P_{NEP} = \frac{h\nu}{\eta} \cdot \sqrt{2(N'_b + N'_d)} \quad (9)$$

表 1 不同光功率下的光子流密度

Table 1 Photon flux on different X-ray power

X-ray power/pW	0.003	0.007	0.017	0.035	0.052	0.105	0.176	0.281	0.352	0.704
Photon flux/ (counts · cm ⁻² · s ⁻¹)	4	8	22	44	70	142	239	381	478	950

2 实验结果与讨论

在实验中以 Crab 脉冲星作为 X 射线脉冲星模拟源,周期为 33.4 ms,将 X 射线脉冲星模拟源放置在距离探测器 80 cm 处.

2.1 最小可探测功率和 SNR

实验测量在不同的入射 X 射线光功率下探测器输出的脉冲计数率和在无入射 X 射线的条件下的脉冲计数率的值,而在不同的入射 X 射线光功率时输入探测器的 X 射线光子数密度则可以通过表 1 得到. 根据式(9)就可计算出最小可探测功率,通过式(6)可以计算出 SNR (累积时间统一设定为 1s). 每个物理量的测量结果或计算结果如表 2. (X 射线光功率、暗计数($N'_b + N'_d$)、信号光子计数 N'_{ph} 为实验中测量得出,SNR 和 P_{min} 是通过表达式计算得出).

表 2 不同光功率下的信噪比和最小可探测光功率

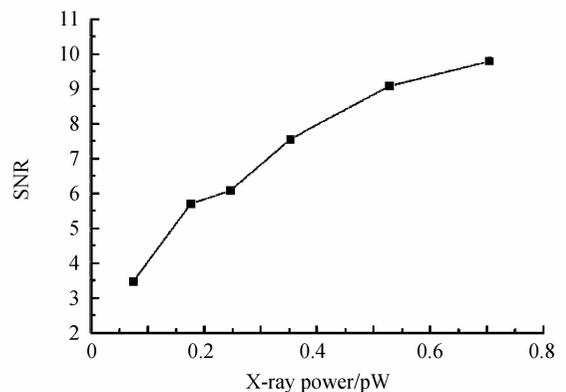
Table 2 SNR and minimum detectable power

X-ray power /pW	$(N'_b + N'_d) /$ (counts · cm ⁻² · s ⁻¹)	$N'_{ph} /$ (counts · cm ⁻² · s ⁻¹)	SNR	$P_{min} /$ (×10 ⁻¹⁶ W)
0.074	0.4	12.8	3.47	3.471
0.176	0.4	33.3	5.70	3.470
0.246	0.4	37.6	6.07	3.630
0.352	0.4	57.8	7.55	3.485
0.528	0.4	83.3	9.08	3.623
0.704	0.4	96.6	9.79	3.574

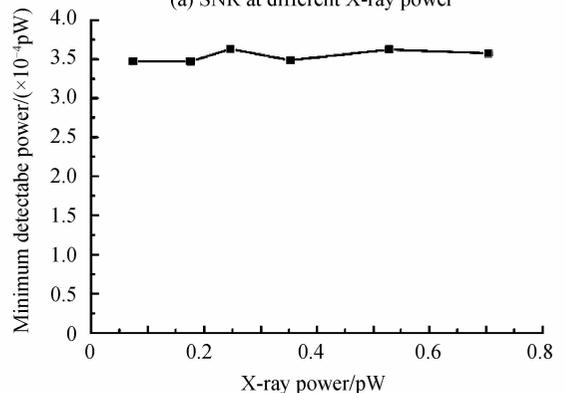
从表 1 得到系统的光功率-SNR 的关系曲线如图 2(a)和光功率-最小可探测功率的关系曲线如图 2(b). 根据图 2(a)可以得出随着 X 射线源的光功率的增加系统的 SNR 也得到了提高,两者之间近似呈

式(6)和(9)分别是在光子计数模式下探测系统的 SNR 和最小可探测功率的关系式. 从公式中可以看出,为了得到探测系统的 SNR 和最小可探测功率需要测量无信号光子入射时噪音产生的输出脉冲计数率、有 X 射线光子入射时探测系统的输出脉冲计数率和入射 X 射线的光子数密度. 前两个量可以通过 X 射线脉冲星导航地面实验系统直接测量. 为了测量入射 X 射线光子数密度,在实验中利用 AXUV100 硅探测器对 X 射线脉冲星模拟源进行标定,可以得到在距离 X 射线源 80 cm 处的光子数密度和 X 射线光功率的关系,如表 1.

现线性关系. 图 2(b)所示的光功率-最小可探测光功率关系曲线可以看出探测系统的最小可探测功率和入射光强无关,系统的最小可探测光功率集中在 3.5×10^{-16} W 附近,所以可以认为整个系统的最小可探测光功率为 3.5×10^{-16} W.



(a) SNR at different X-ray power



(b) The minimum detectable power at different X-ray power

图 2 光功率与信噪比及最小可探测光功率的关系
Fig. 2 Curve of SNR and the minimum detectable power at different X-ray power

实验测试了入射光功率对累积脉冲轮廓 SNR 的影响. 图 3 是光功率分别为 0.074 pW、0.246 pW

和 0.528 pW 时采集 30 s 的累积脉冲轮廓. 比较图 3(a)~(c) 可以看出入射光功率增加时累积脉冲轮廓的 SNR 也得到提高, 曲线也趋于光滑. 分析原因是由于光功率增加时, 入射到 X 探测器的光子流密度也随之增加, 探测器的 SNR 也会增加. 由于噪音信号是随机的, 而入射光子产生的脉冲信号具有周期性, 当以入射 X 射线脉冲的周期拟合累积脉冲轮廓时, 探测系统 SNR 提高, 累积脉冲轮廓 SNR 提高, 拟合曲线也会趋于光滑.

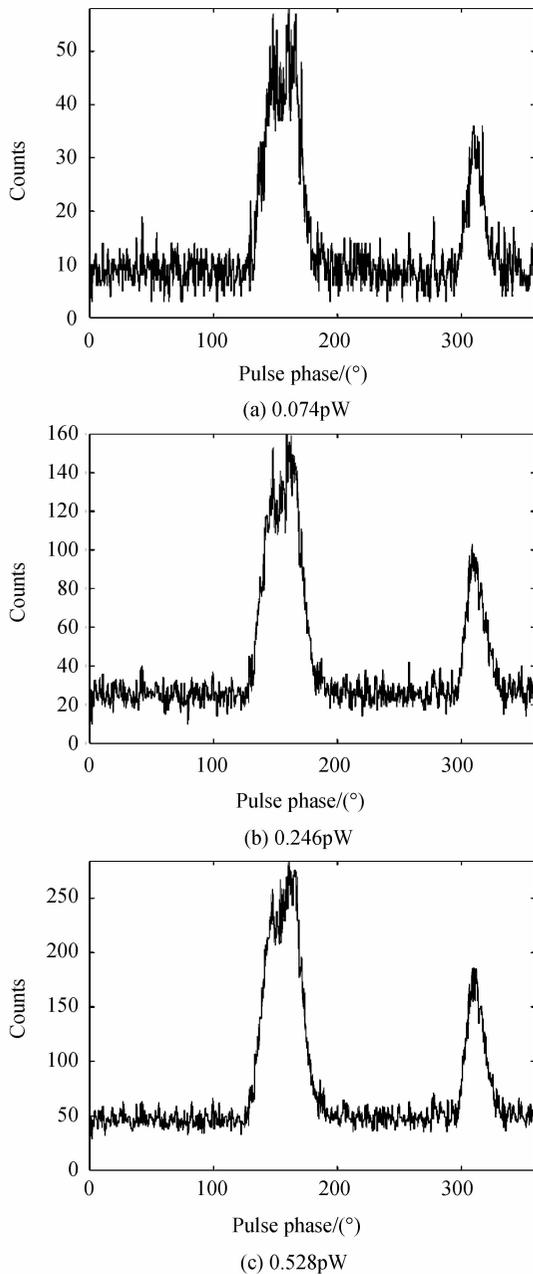


图 3 不同光功率下的累积脉冲轮廓

Fig. 3 Integrated pulse profile at different optical power

2.2 不同累积时间

图 4 为分别选择累积时间为 15 s、300 s 和 1 800 s 时的累积脉冲轮廓图. 从图中可以看出, 随着累积时间的增加, 脉冲星的累积脉冲轮廓的 SNR

也得到提高, 轮廓波形趋于光滑, 主峰和次峰也可以明显区分. 从式(6)知道, 累积时间的增加使得探测系统输出脉冲 SNR 提高, 而探测系统 SNR 的提高会使得累积脉冲轮廓 SNR 得到提高, 轮廓曲线的光滑度得到改善. 但是累积时间过长会影响导航的实时性, 因此累积时间必须充分考虑累积脉冲轮廓的 SNR 和实时性.

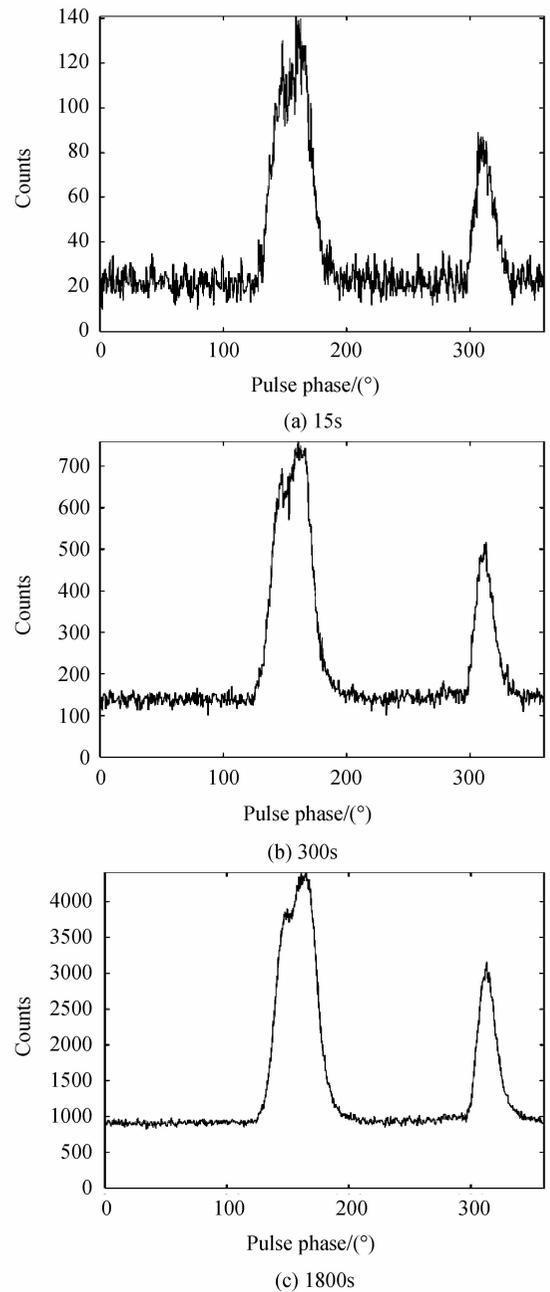


图 4 不同累积时间的脉冲轮廓拟合曲线

Fig. 4 Pulse profile at different integration time

2.3 不同阈值电压

调节输出电路中电压阈值甄别单元的阈值电压大小来研究不同阈值电压大小对探测器输出信号脉冲 SNR 的影响, 如图 5. 从图 5 可以看到, 在阈值电压为 $-100 \sim -200$ mV 范围内 SNR 比较高, 而在电压阈值为 -150 mV 时 SNR 最高为 26.3.

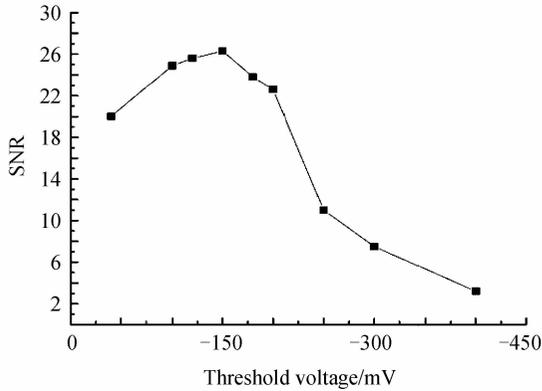


图 5 阈值电压和信噪比的关系

Fig. 5 SNR at different threshold voltage

图 6 分别为电压阈值为 -51 mV 、 -150 mV 和 -300 mV 时的脉冲轮廓累积图. 从图 6 中可以看

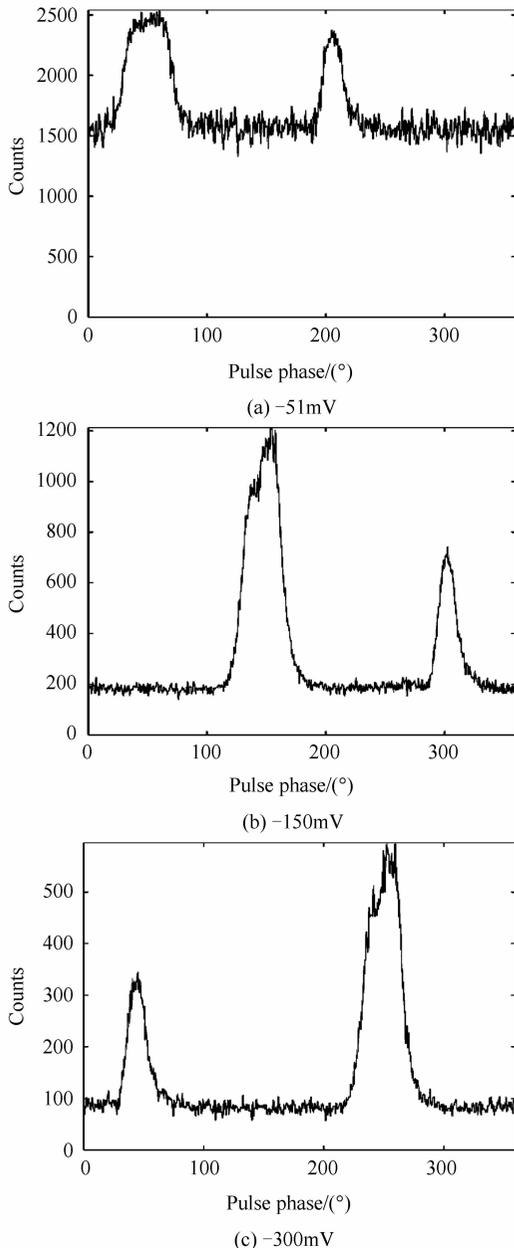


图 6 不同电压阈值的累积脉冲轮廓图

Fig. 6 Pulse profile at different threshold voltage

出当电压阈值为 -150 mV 时的累积脉冲轮廓图的 SNR 最优,这主要是由于 MCP 探测器本身的输出信号特征引起的^[14].

图 7 是在 X 射线导航系统中根据前置放大器输出信号的脉冲高度所制作的脉冲高度分布曲线 (Pulse Height Distribution, PHD). 从图中可以看出电压幅度在 $0\sim-100\text{ mV}$ 时主要是噪音信号,而噪音信号主要是 MCP 探测器自身的暗发射引起的噪音. 入射 X 射线产生的信号脉冲主要集中在 $-200\sim-250\text{ mV}$ 的范围内. 因此在实验中设置阈值甄别是非常有必要的,而由于此实验中阈值电压的设置是在前置放大之后,那么阈值电压的大小与整个系统的电流灵敏前置放大器的放大倍数有关,在本实验条件下阈值为 -150 mV 时最佳. 阈值设置太高会导致探测器记录的有效光子事件减少,因而累积轮廓的 SNR 降低,如图 7 中阈值为 -300 mV 时 SNR 和累积脉冲轮廓均比 -150 mV 时差.

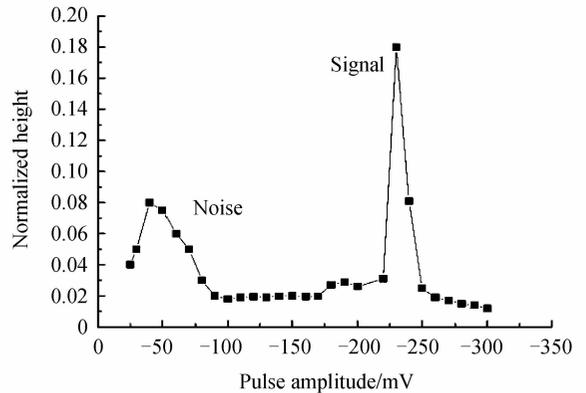


图 7 探测器系统的脉冲高度分布曲线

Fig. 7 Pulse height distribution of the detector

根据导航准确度的定义^[15],累积脉冲轮廓的 SNR 对 X 射线脉冲星导航的导航准确度有非常重要的影响,因此系统 SNR 对提高整个导航系统的导航准确度极为重要. 由于在 X 射线脉冲星导航中主要是探测遥远的 X 射线脉冲星所发出的信号,因而评估整个探测系统的最小可探测功率对研究可探测的脉冲星流量密度和选取脉冲星有着重要的意义.

3 结论

本文对 X 射线脉冲星导航系统的工作原理进行了阐述,推导了在光子计数模式下系统 SNR 和最小可探测功率的关系表达式,并在原 X 射线脉冲星导航地面实验系统的基础上搭建了测量 SNR 和最小可探测功率的实验装置. 实验结果显示 X 射线脉冲星系统的最小可探测功率为 $3.5\times 10^{-16}\text{ W}$. 研究了不同累积时间、不同光功率和不同阈值电压对 X

射线累积脉冲轮廓 SNR 的影响,实验表明随着累积时间和光功率的增加,累积脉冲轮廓的 SNR 得到提高;当阈值电压为 -150 mV 时 SNR 最优. 该研究为提高 X 射线脉冲星导航系统准确度、提高 X 射线脉冲累积轮廓的 SNR 提供了重要的理论和实验支持.

参考文献

- [1] NICASTRO L, CUSUMANO G, LOHMER O, *et al.* BeppoSAX observation of PSR B1937+21[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2004, **413**: 1065-1072.
- [2] SHEIKH S I. Spacecraft navigation using X-ray pulsars[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2006, **29**(1): 49-63.
- [3] PAUL G, JOHN C, SHEIKH S I, *et al.* XNAV beyond the moon[C]. Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Institute of Navigation, Cambridge, 2007: 423-431.
- [4] SHEIKH S I. The use of variable celestial[D]. Maryland: University of Maryland, 2005: 97-95.
- [5] 帅平, 李明, 陈绍龙, 等. X 射线脉冲星导航系统原理与方法[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 379-390.
- [6] SHEIKH S I, JOHN E H, JOHN C, *et al.* Deep space navigation augmentation using variable celestial X-ray sources [C]. Institute of Navigation 2009 International Technical Meeting, Anaheim, CA, Jan 2009: 34-48.
- [7] YANG Ting-gao, GAO Yu-ping. Pulsar time scale and preliminary analysis of TOA prediction[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2012, **35**(1): 16-23.
杨廷高, 高玉平. 脉冲星时间尺度及其 TOA 预报初步分析[J]. 时间频率学报, 2012, **35**(1): 16-23.
- [8] SHENG Li-zhi, ZHAO Bao-sheng, HU Hui-jun, *et al.* Temporal resolution of X-ray detector for pulsar navigation [C]. Proc. SPIE 8196, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Space Exploration Technologies and Applications, 2011: 81961C.
- [9] HU Hui-jun. Research of MCP-based X-ray photon counting detector and key technology for X-ray pulsar navigation[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2011: 91-96.
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]. 西安: 中国科学院西安光机所, 2011: 91-96.
- [10] CHEN Bao-mei, ZHAO Bao-sheng, HU Hui-jun, *et al.* X-ray photon-counting detector based on a micro-channel plate for pulsar navigation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(6): 060404.
- [11] HU Hui-jun, ZHAO Bao-sheng, SHENG Li-zhi, *et al.* 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, 等. 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.
- [12] MIAO Zhen-hua. Single photon imaging system based on WSA anode [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009: 44-52.
缪震华. 基于楔条形阳极探测器的单光子成像系统[D]. 西安: 中国科学院西安光机所, 2009: 44-52.
- [13] ZHANG Xing-hua, ZHAO Bao-sheng, LIU Yong-an, *et al.* Gain characteristic of ultraviolet single photon imaging system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1779-1784.
张兴华, 赵宝升, 刘永安, 等. 紫外单光子成像系统增益特性研究[J]. 物理学报, 2009, **58**(3): 1779-1784.
- [14] LIU Yong-an, ZHAO Bao-sheng, ZHU Xiang-ping, *et al.* Analysis and testing of wedge-and-strip anode detector characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 750-755.
刘永安, 赵宝升, 朱香平, 等. 楔条形阳极探测器的性能测试与分析[J]. 光子学报, 2009, **38**(4): 750-755.
- [15] 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准确度的研究[J]. 物理学报, 2012, **61**(20): 209702.