

引用格式: LI Baoquan, LI Fan, CAO Yang, et al. Research on Accuracy of Photon Arrival Time Labeling Based on APD Single Photon Detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(7):0734003

李保权, 李帆, 曹阳, 等. 基于 APD 单光子探测器的光子到达时间标记精度研究[J]. 光子学报, 2023, 52(7):0734003

基于 APD 单光子探测器的光子到达时间标记精度研究

李保权^{1,2}, 李帆^{1,2}, 曹阳¹, 桑鹏¹

(1 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了准确测量 X 射线脉冲星导航中的光子到达时间, 提出了一种 X 射线探测器光子到达时间精度的测试系统, 该系统主要由脉冲 X 射线发生器、任意波形发生器、雪崩光电二极管探测器和时间标记光子计数器组成。系统测量脉冲 X 射线发生器的控制脉冲信号与雪崩光电二极管探测器测量的输出信号之间的时间延迟, 研究时间延迟的分布情况, 该分布的标准差可以反映被测探测器的光子到达时间测量精度。实验结果显示, 雪崩光电二极管探测器输出信号相比控制信号的时间延迟约 9.03 ns, 标准差为 2.23 ns, 即雪崩光电二极管探测器的光子到达时间精度为 2.23 ns, 表明其能够实现对 X 射线单光子的快时间响应与高精度标记。

关键词: X 射线; X 射线调制源; 光子到达时间精度; 雪崩光电二极管; 脉冲星导航

中图分类号: O434.1; TL816+.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235207.0734003

0 引言

脉冲星是一种具有超稳定自转周期的中子星^[1], 被誉为自然界最稳定的天然时钟^[2-3]。X 射线脉冲星导航技术利用脉冲星作为导航信标, 不需要地面系统支持^[4], 可以完善航天器的自主导航功能, 是目前导航领域的研究热点^[5]。

X 射线计时探测器是导航中的关键部件之一, 由于脉冲星发射的脉冲光子流量非常低, 探测器接收到的光子数目较少, 因此对探测器的灵敏度要求很高。在对 X 射线脉冲星进行观测时, 准确测量脉冲星的脉冲到达时间 (Time of Arrival, TOA) 是非常重要的一环, 探测器对 X 射线单光子到达时间的测量精度将影响脉冲星 TOA 的测量精度, 是影响导航系统性能的关键因素之一^[6]。

目前 X 射线脉冲星导航方面, 应用的 X 射线单光子探测器主要有硅漂移探测器 (Silicon Drift Detector, SDD)^[7]、雪崩光电二极管探测器 (Avalanche Photodiode, APD)^[8] 等。SDD 探测器的能量分辨率很高, 但探测器中的电子漂移时间与 X 射线光子入射位置有关, 影响探测器的光子到达时间标记精度, 进而影响到脉冲星 TOA 的测量精度。2017 年 6 月中子星内部组成探测器 (NICER) 发射至国际空间站^[9], 其内部搭载了 X 射线定时仪 (X-ray Timing Instrument, XTI)^[10], 采用 SDD 测量光子到达时间标记。麻省理工学院对 SDD 的计时特性进行了研究, 采用紫外线 LED 激发 X 射线源, 信号发生器产生脉宽约 20 ns 的激发脉冲, 控制 X 射线源出射 X 射线脉冲, 用示波器测量激发脉冲与 SDD 探测器输出脉冲的时间间隔, 其标准差反映光子到达时间精度^[6]。结果显示, 该 SDD 探测器的光子到达时间精度与光子到达位置有关, 中心精度最高, 边缘精度差, 探测器光子到达时间精度优于 100 ns^[11]。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2017YFB0503300)

第一作者: 李保权, lbq@nssc.ac.cn

通讯作者: 曹阳, caoyang@nssc.ac.cn

收稿日期: 2023-02-10; 录用日期: 2023-05-04

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

APD利用碰撞电离产生的雪崩倍增效应产生电流增益,探测效率高,时间响应快,同时光子入射位置不影响探测信号的响应时间,测量到达时间准确且精度高^[12-13],已有卫星将其搭载上天,例如日本的Cute-1.7+APD、Cute-1.7+APD II系列卫星^[14-15],证明其能够在太空中运行。APD探测器的能量分辨率不如SDD,不过在脉冲星导航应用中对此要求不高。APD有两种基本工作模式:线性模式与盖革模式。其中,工作在盖革模式时的APD也称为单光子雪崩光电二极管(Single Photon Avalanche Photodiode, SPAD),北京空间机电研究所对盖革模式下的APD探测器的时间响应特性进行了研究,由激光发生器代替X射线源,产生具有特定时间信息的输入信号,由示波器测量数据,测得探测器光子到达时间精度优于35.56 ns^[16]。

为选择更合适应用于脉冲星导航的探测器,本文提出了一种对X射线探测器光子到达时间标记精度进行测量的系统,该系统采用X射线调制管作为脉冲X射线发生器,脉冲调控方便迅速,使用时间标记光子计数器进行高精度光子到达时间标记,最后用本系统对APD探测器的时间响应特性进行了测量。

1 TOA 精度测试系统的组成和工作原理

为了高精度测量APD探测器光子到达时间精度,验证其应用于脉冲星导航的可行性,搭建了组成结构如图1所示的X射线单光子探测器光子到达时间精度测试系统。该系统由四个主要部分构成:1)X射线调制源,包含X射线调制管以及为其提供电压的高压及控制电路;2)任意波形发生器,产生X射线调制管调制极所需调制信号,控制X射线调制管光子发射;3)被测X射线单光子探测器,这里APD探测器作为被测量对象,接收脉冲X射线发生器发射的光子脉冲信号,研究APD探测器光子到达时间精度;4)时间标记光子计数器,同时接收任意波形发生器的脉冲控制信号和APD探测器的输出信号,测量两者的脉冲到达时间间隔分布,分析待测X射线探测器的时间响应特性。X射线单光子探测器光子到达时间精度测试系统实物如图2所示,其中1为脉冲X射线发生器,2为APD探测器,3为任意波形发生器,4为时间标记光子计数器。

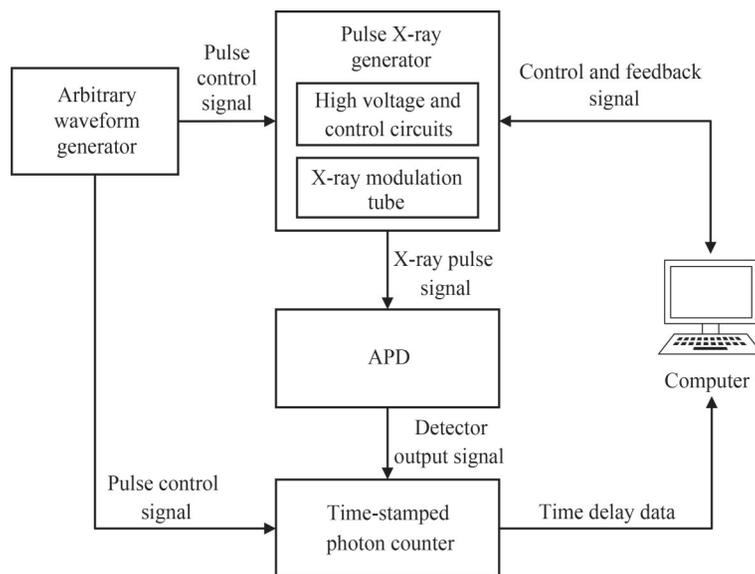


图1 X射线单光子探测器光子到达时间精度的测试系统结构

Fig.1 Structure diagram of the test system for X-ray single photon detector photon arrival time accuracy

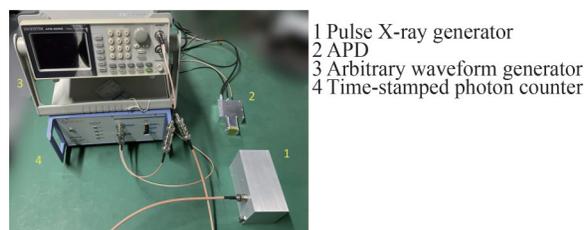


图2 X射线单光子探测器光子到达时间精度的测试系统实物

Fig.2 Real picture of the test system for X-ray single photon detector photon arrival time accuracy

1.1 脉冲X射线发生器

脉冲X射线发生器由X射线调制管和高压及控制电路组成,X射线调制管的实物和结构如图3、4所示,高压及控制电路为X射线调制管的阴极、三个聚焦极和阳极供电,任意波形发生器控制脉冲X射线发生器的调制极脉冲波形,两者共同控制X射线调制管工作。在X射线调制管中,阴极灯丝通电后加热释放电子,电子在阳极高压下加速,调制极调节电子通过数量,聚焦极聚焦电子束,最终电子束撞击阳极靶激发X射线。其中,调制极电压形成的电场相当于热阴极的外电场,当给调制极电压施加逐渐增大的负电压时,可抑制电子通过调制极的数量,抑制能力随负电压增大而增大,直至完全抑制,无法激发X射线,该电压为截止电压。



图3 X射线调制管实物

Fig.3 Real picture of X-ray modulation tube

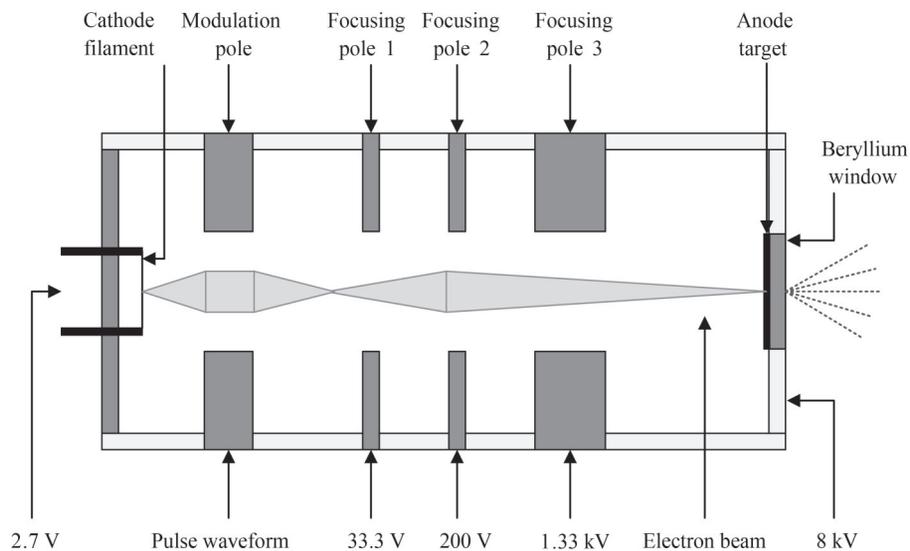


图4 X射线调制管结构

Fig.4 Structure diagram of X-ray modulation tube

利用SIMION静电透镜分析仿真软件,对该X射线管的运动电子学进行了仿真,通过优化得到灯丝电压、三个聚焦极及阳极电压分别设置为0.6 V、48 V、200 V、1 kV和15 kV时,调制极截止电压为-0.6 V,且在-0.6~9 V范围内打靶电子数随调制极电压增大而增大,呈正相关^[17]。在实际测试中,阴极灯丝、三个聚焦极和阳极对应电压分别设置为2.7 V、33.33 V、200 V、1.33 kV和8 kV,得到调制极截止电压为-3 V,保证完全截止,X射线强度与调制极电压之间的关系如图5所示。

1.2 任意波形发生器

任意波形发生器产生调制信号,控制X射线调

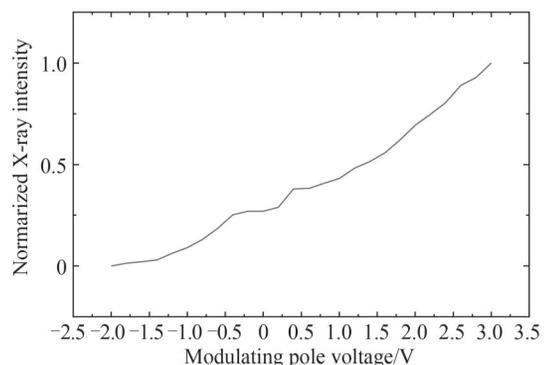


图5 实测X射线强度与调制极电压关系

Fig.5 Measured relationship between normalized X-ray intensity and modulation pole voltage

制管的输出脉冲,对脉冲星信号进行模拟时,可产生具有对应脉冲轮廓的控制信号。由于本文所用的X射线调制管所需的调制电压很低,且测量X射线单光子探测器所需的调制信号比较简单,最常见的信号发生器就能满足需求,为简化实验,使用信号发生器代替任意波形发生器的功能。在测量探测器光子到达时间精度的实验中,任意波形发生器的脉冲控制信号设定为 $-3\sim 1\text{ V}$ 变化的窄脉冲。调制极电压为 1 V 时,脉冲X射线发生器可正常发射X射线光子;调制极电压为 -3 V 时,电子束被完全抑制,无X射线光子产生。

该过程反应迅速,X射线脉冲信号的发射时间由调制极控制脉冲信号确定,且调制极所需控制电压比较小,易于产生和调控,通过调制极调控的方式,能够快速实现对输出的X射线光子强度的控制。

1.3 待测单光子探测器

本文用于测试的单光子探测器为APD探测器。该APD探测器的传感器为拉通型APD(型号C30703H),其光电灵敏面积为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,吸收层厚度为 $120\text{ }\mu\text{m}$,偏置电压为 370 V 。该APD探测器具有较高增益,可以在线性模式工作下实现X射线单光子的探测,对 8 keV 的X射线探测效率高于 80% 。通过该光子到达时间精度测试系统可对该APD探测器时间特性进行精确测量,进一步了解其性能。在测试系统中,APD探测器接收X射线光子信号,经放大电路处理后,测得的单光子信号输出波形如图6所示,脉宽约为 20 ns ,信号幅度大小约为 150 mV ,将该探测器输出信号接入时间标记光子计数器,测量时采用下降沿触发。

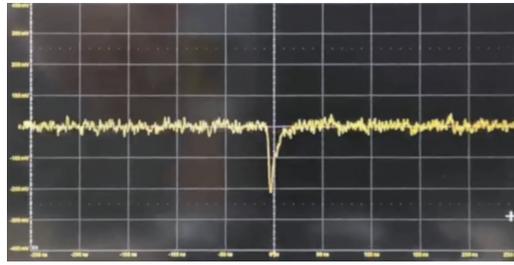


图6 APD探测器接收X射线脉冲光子信号

Fig.6 APD detector receiving X-ray pulse photon signal

1.4 时间标记光子计数器

时间标记光子计数器具有两路输入,分别用来接收任意波形发生器的控制信号和单光子探测器输出信号,并测量两者之间的脉冲到达时间间隔,测量模式如图7所示。

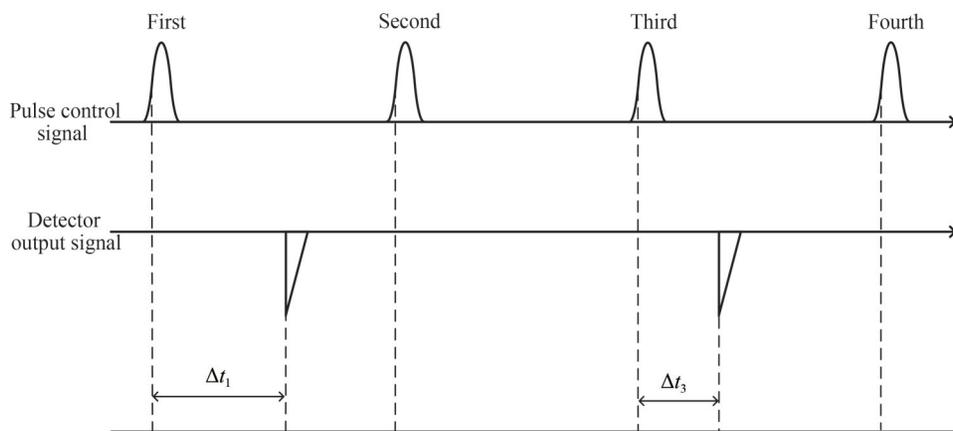


图7 时间标记光子计数器的测量模式

Fig.7 Measurement mode of time-marked photon counter

理论上测量得到的脉冲到达时间间隔受到多种因素的干扰,脉冲到达时间间隔分布的标准偏差可以表示为

$$\sigma_{\text{all}}^2 \approx \sigma_X^2 + \sigma_{\text{TOA}}^2 + 2\sigma_C^2 \quad (1)$$

式中, σ_X^2 表示X射线调制管输出X射线光子相对于控制信号延迟的不确定性导致的误差,由于本文所用的X

射线调制管的响应频率极高,且输出窄脉冲时单个平均光子数非常少,所以 σ_X^2 主要取决于任意波形发生器的波形; σ_{TOA}^2 表示由单光子探测器决定的TOA标记精度; σ_C^2 表示时间标记光子计数器的计时误差。

为了测量出准确的TOA标记精度,即 σ_{TOA}^2 ,必须将 σ_X^2 和 σ_C^2 控制到足够小,由于时间标记光子计数器的误差较小, σ_C^2 可以忽略不记,主要需要将 σ_X^2 控制到足够小。

任意波形发生器的脉冲控制信号选择上升沿触发,触发电平为 -1 V ;APD探测器的测量输出信号选择下降沿触发,触发电平为 -90 mV ,得到的数据为APD探测器对脉冲X射线发生器控制信号的时间响应间隔,即图7中 Δt_1 、 Δt_3 等,一般一个周期内测得光子数非常少,没有光子或只有1个光子。时间标记光子计数器时间分辨率为 16 ps ,能够高精度测量探测器时间响应延迟分布情况,该分布的标准差即为探测器光子到达时间精度。

2 实验结果与分析

实验中,脉冲宽度设置为 25 ns ,实际调制极控制信号的波形如图8所示,频率为 1 MHz 。窄脉冲波形是为了保证X射线调制管在一个脉冲周期中,仅产生一个光子或一定概率无光子产生,避免产生多个光子的情况,减少误差干扰。同时,窄脉冲也可确保在X射线调制管导通的极短时间内,X射线光子能够集中在同一时刻发射,避免光子发出时刻分散。

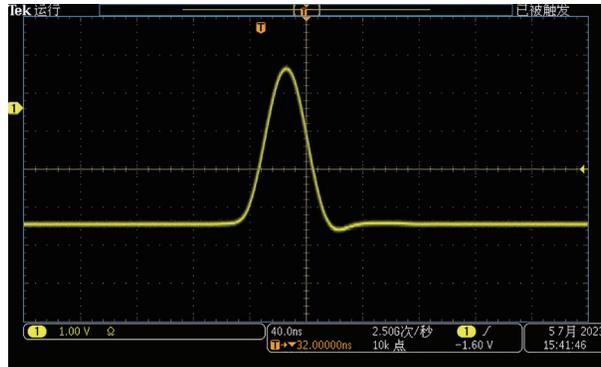


图8 调制极控制信号波形

Fig. 8 The modulating pole control signal waveform

实验测量 100 s 的数据,采集数据后经过处理得到的探测器时间响应延迟分布情况如图9所示。测得的时间延迟数据中,时间延迟最小值为 3.49 ns ,主要集中在 $4\sim 14\text{ ns}$ 范围内,整体分布近似于高斯分布,将其拟合高斯分布模型,结果如图10所示,该模型的均值为 9.03 ns ,标准差为 2.23 ns ,探测器光子到达时间精度即为时间延迟的标准差 2.23 ns 。

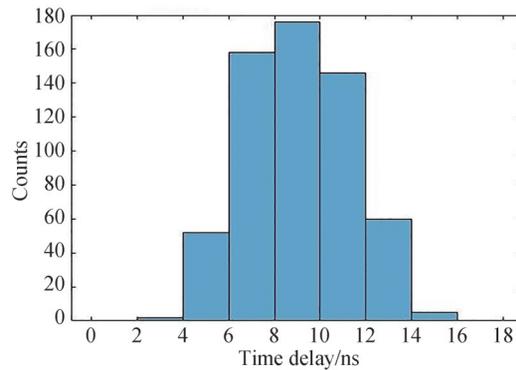


图9 探测器时间响应延迟分布情况

Fig.9 Distribution of detector time response delay

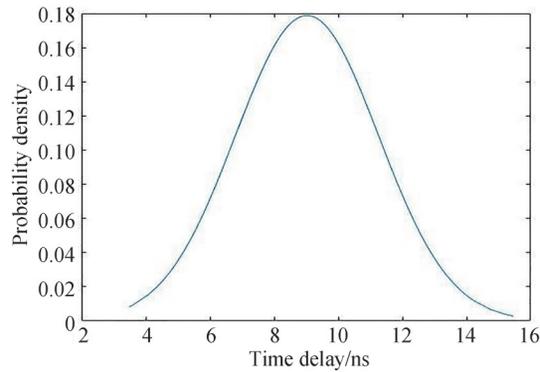


图10 探测器时间响应延迟分布情况的高斯拟合曲线
Fig.10 Gaussian fitting curve of the detector time response delay distribution

结果表明,APD探测器具有快时间响应特性,时间响应延迟的均值仅为9.03 ns,同时探测 TOA 精度优于2.23 ns,可实现对X射线光子到达时间的高精度标记,其光子到达时间精度是NICER使用的SDD探测器的近50倍。

3 结论

本文基于X射线脉冲星导航的需求,研究了一套测量X射线单光子探测器光子到达时间精度的模拟脉冲星测试系统,利用该系统测试了APD探测器光子到达时间精度,得到APD探测器的时间延迟均值约9.03 ns,探测器光子到达时间精度优于2.23 ns。结果表明APD探测器时间响应快、测量精度高,能够实现X射线单光子的快时间响应高精度标记。该X射线光子到达时间测试系统易于操作控制,测量结果精度高,测量效率高,适用性广,满足X射线探测器光子到达时间精度的测量要求,可对多种X射线单光子探测器进行实验测试,对X射线探测器选型及应用于脉冲星导航后的导航精度测算具有一定意义。

参考文献

- [1] LI Liansheng, MEI Zhiwu, LV Zhengxin, et al. Overview of the development of X-ray pulsar navigation detection technology[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(5):1-9.
李连升,梅志武,吕政欣,等.X射线脉冲星导航探测技术发展综述[J].兵器装备工程学报,2017,38(5):1-9.
- [2] TAYLOR J H. Millisecond pulsars: nature's most stable clocks[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 79(7):1054-1062.
- [3] ZHOU Qingyong, WEI Ziqing, LIU Siwei, et al. Development history and thinking of autonomous navigation technology for X-ray pulsars [C]. Satellite Navigation and Positioning and Beidou System Application 2018-Deepening Beidou Application to Promote Industrial Development, 2018: 18-25.
周庆勇,魏子卿,刘思伟,等.X射线脉冲星自主导航技术发展历程及思考[C].卫星导航定位与北斗系统应用2018-深化北斗应用促进产业发展,2018:18-25.
- [4] HUANG Liangwei. Research on autonomous navigation theory and algorithm of X-ray pulsar based on timing model [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
黄良伟.基于计时模型的X射线脉冲星自主导航理论与算法研究[D].北京:清华大学,2013.
- [5] ELY T, BHASKARAN S, BRADLEY N, et al. Comparison of deep space navigation using optical imaging, pulsar time-of-arrival tracking, and/or radiometric tracking[J]. Journal of the Astronautical Sciences, 2022, 69(2):385-472.
- [6] PRIGOZHIN G, GENDREAU K, FOSTER R, et al. Characterization of the silicon drift detector for NICER instrument [C]. SPIE, 2012, 8453: 366-372.
- [7] RETTENMEIER F, MAURER L. Utilization of adaptive flattop time with large area silicon drift detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2021, 998(2):165192.
- [8] KOTOKU J, KATAOKA J, KURAMOTO Y, et al. Design and development of Tokyo Tech pico-satellite Cute1.7[C]. SPIE, 2005, 5898: 58980Z.
- [9] GREGORY P, KEITH G, JOHN P D, et al. NICER instrument detector subsystem: description and performance[C]. SPIE, 2016, 9905:990511.
- [10] GENDREAU K C, ARZOUMANIAN Z, ADKINS P W, et al. The Neutron star Interior Composition Explorer (NICER): design and development[C]. SPIE, 2016, 9905:116.
- [11] WINTERNITZ L M B, HASSOUNEH M A, Mitchell J W, et al. X-ray pulsar navigation algorithms and test-bed for

- SEXTANT[C]. 2015 IEEE Aerospace Conference, 2015: 1-14.
- [12] MASUDA T, OKUBO S, HARA H. et al. Fast X-ray detector system with simultaneous measurement of timing and energy for a single photon[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88:063105.
- [13] LI Zhenjie, ZHOU Yangfan, LI Qiuju, et al. Design of nanosecond time-resolved APD detector for synchrotron radiation [C]. Proceedings of the 18th National Annual Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology, 2016: 282-287.
李贞杰, 周杨帆, 李秋菊, 等. 基于APD的同步辐射纳秒时间分辨探测器的设计[C]. 第十八届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集, 2016: 282-287.
- [14] KATAOKA J, TOIZUMI T, NAKAMORI T, et al. In-orbit performance of avalanche photodiode as radiation detector on board the picosatellite Cute-1.7+APD II[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: A05204.
- [15] ASHIDA H, FUJIHASHI K, INAGAWA S, et al. Design of Tokyo Tech nano-satellite Cute-1.7+APD II and its operation[J]. Acta Astronautica, 2010, 66(9-10):1412-1424.
- [16] DONG Long, FU Danying, GONG Zhipeng. Design of the X-ray single photon detection circuit based on Si-APD[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(1): 55-62.
董龙, 傅丹膺, 龚志鹏. 一种基于Si-APD的X射线单光子探测电路设计[J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(1): 55-62.
- [17] MOU Huan. The vacuum-sealed transmission-type miniature and micro-beam modulated X-ray source [D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2017.
牟欢. 真空密封透射式微型微束调制X射线源[D]. 北京:中国科学院国家空间科学中心, 2017.

Research on Accuracy of Photon Arrival Time Labeling Based on APD Single Photon Detector

LI Baoquan^{1,2}, LI Fan^{1,2}, CAO Yang¹, SANG Peng¹

(1 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

Abstract: X-ray pulsar navigation technology uses pulsars as navigation beacons, and multiple pulsars with orderly distribution in space are selected to form a function similar to the existing navigation satellite network. X-ray detectors receive highly stable pulse signals emitted by distant pulsars, record photon arrival time, and then determine the position, attitude, speed and time of spacecraft through algorithms to provide navigation information for spacecraft and realize autonomous navigation. Accurate measurement of photon arrival time is a very important part of X-ray pulsar navigation, and photon arrival time accuracy is an important factor affecting the navigation accuracy. Therefore, a measuring system for photon arrival time accuracy of X-ray detector is established. The system mainly consisted of pulse X-ray generator, arbitrary waveform generator, Avalanche Photodiode (APD) and time-marked photon counter. The pulse X-ray generator consists of X-ray modulation tube and high-voltage and control circuit. In the X-ray modulation tube, the cathode filament is energized and heated to release electrons, which are accelerated at high anode pressure, the modulating electrode adjusts the number of electrons passing through, the focusing pole focuses the electron beam, and finally the electron beam hits the anode target to produce X-rays. Among them, the electric field formed by the modulating pole voltage is equivalent to the external electric field of the hot cathode. When the modulator voltage is negative, the electron beam can be blocked from passing through the modulator. After the negative voltage gradually increases, the electron beam is completely blocked and cannot stimulate the X-ray. This voltage is the cut-off voltage, which is -3 V after test. The arbitrary waveform generator generates a pulse control signal to control the modulation pole of the X-ray modulation tube. When an arbitrary waveform generator controls the pulse X-ray generator to simulate the pulsar signal, the control pulse with corresponding pulse profile can be generated. In this experiment, in order to simplify the experiment, the function of arbitrary waveform generator is replaced by a signal generator, and the pulse control signal is set as a narrow pulse varying from -3 V to 1 V , with a pulse width of 25 ns . When the modulation pole voltage is 1 V , the pulse X-ray generator can normally emit X-ray photons. When the modulation pole voltage is -3 V , no X-ray photon is produced. The narrow pulse waveform is designed to ensure that only one photon or a certain probability of no photon is

generated in an X-ray modulation tube in a pulse period, so as to avoid the occurrence of multiple photons and reduce the error interference. At the same time, the narrow pulse can also ensure that the X-ray photons can be concentrated at the same time during the very short time when the X-ray modulation tube is on, so as to avoid the scattering of photon emission time. The APD detector receives the X-ray photon signal, each photon received generates a negative pulse with a pulse width of about 20 ns and a signal amplitude of about 150 mV, and the output pulse is connected to the time-marked photon counter. The time-marked photon counter measures the time delay between the control pulse signal generated by the arbitrary waveform generator and the measured output signal of the APD detector. Then the distribution of delay is studied, and the results show that compared with the control signal, the time delay of the APD output signal is about 9.03 ns, and the standard deviation is 2.23 ns, that is, the photon arrival time precision of the APD is 2.23 ns. The results show that the APD can realize the fast time response and high precision labeling of the single X-ray photon.

Key words: X-ray; X-ray modulation source; Photon arrival time accuracy; Avalanche photodiode; Pulsar navigation

OCIS Codes: 340.7480; 230.5160; 230.5170