

X 射线脉冲星导航系统中脉冲轮廓的探测与拟合

陈宝梅^{1,2} 赵宝升¹ 胡慧君^{1,2} 盛立志^{1,2} 鄢秋荣^{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, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 在原有 X 射线脉冲星导航地面模拟系统的基础上, 提出了新的方法, 对该系统的时间分辨率与时间精度进行了优化, 进而提高航天器导航的精度与实时性. 所采用的具体方法为: 1) 改进基于微通道板 (MCP) 的光子计数探测器; 2) 采用高精度的时间测量系统. 比较改进前后的探测系统拟合的脉冲轮廓, 分析改进后系统的 MCP 增益对脉冲轮廓探测的影响. 实验结果表明, 在同样的实验条件下, 改进后的探测系统计数率更高. 改进后的探测系统在每块 MCP 工作电压为 -800 V 时, Bin 的值为 1.5 ms , 积分 200 s 后能够得到较好信噪比的脉冲轮廓。

关键词 探测器; 光子计数探测器; X 射线脉冲星导航; 脉冲到达时间测量; 脉冲轮廓拟合

中图分类号 P128.4; TN151⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0534002

Detection and Fitting of Pulse Profile for X-Ray Pulsar Navigation System

Chen Baomei^{1,2} Zhao Baosheng¹ Hu Huijun^{1,2} Sheng Lizhi^{1,2} Yan Qiurong^{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, Shaanxi 710119, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Several new methods to improve the time accuracy and resolution based on the original X pulsar navigation ground simulation system are proposed. By these proposed methods, the accuracy and real-time performance of the spacecraft navigation has been enhanced. The methods adopted include: 1) enhancing the performance of the photon counting detector based on micro-channel plate (MCP); 2) using time measurement system with high accuracy. The pulse profile of the original detection system is compared with the pulse profile of the improved detection system, and the gain of MCP which has influence on the detected pulse profile is discussed. The experimental results show that the counting rate of improved detection system becomes higher under the same experimental condition. When the operating voltage of MCP is -800 V in the improved detection system, and the value of Bin is 1.5 ms , a pulse profile with good signal-to-noise ratio (SNR) can be acquired after being integrated for 200 s .

Key words detectors; photon counting detector; X-ray pulsar navigation; pulse's time of arrival measurement; pulse profile fitting

OCIS codes 340.7480; 040.7480; 250.0040; 120.18801

1 引 言

X 射线脉冲星具有良好的周期稳定性, 尤其是毫秒级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天文时钟^[1]. 其应用研究主要集中在两个方面: 1) 脉冲星时间计量方法和时频基准建立研究; 2) 基于 X 射线脉冲星的航天器自主导航技

术的研究^[2,3]. 通过对 X 射线脉冲星的探测能够为近地轨道、深空和星际空间飞行的航天器提供位置、速度、时间和姿态等丰富的导航信息, 实现航天器全程高精度自主导航和运行管理. 航天器的自主导航既减少了维持地面站运行的费用, 也使航天器的自主生存能力得到提高, 在战时可摆脱地基导航系统的束

收稿日期: 2010-10-08; **收到修改稿日期**: 2011-01-18

作者简介: 陈宝梅 (1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事 X 射线脉冲星导航地面模拟系统方面的研究。

E-mail: 04cbm@live.cn

导师简介: 赵宝升 (1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子领域方面的研究. E-mail: open@opt.ac.cn

缚,建立完整的天基导航体系,具有广阔的应用前景^[4]。目前利用射电望远镜对脉冲星的脉冲到达时间(TOA)的观测技术已经非常成熟,但因脉冲星在射电波段辐射非常微弱,需要大口径的望远镜以及较高的指向精度和信号处理技术^[5]。且射电容易因星际物质而引起色散问题,难以得到满意的 TOA 测量精度。而在软 X 射线能量波段观测脉冲星能够获得满意的 TOA 信噪比,且不存在星际物质引起色散问题,能获得满意的 TOA 测量精度。

TOA 的测量主要是通过积分脉冲轮廓与标准脉冲轮廓的比较来测定时间差 Δt_{off} ,而积分脉冲轮廓和标准脉冲轮廓是通过计时观测系统记录下每次光子事件到达时原子钟的时间,经过一定时间的积分,根据已知的脉冲周期,将光子到达时间进行历元叠加得到的^[6]。因此光子事件到达时间的测量是导航定位的基本观测量。为此研究提高 X 射线脉冲探测器的信噪比、时间分辨率以及信号与数据处理的精度等技术,具有重要的理论和实践意义。

本文主要对基于微通道板的 X 射线光子计数

探测器以及后继电子学和信号与数据处理系统进行了研究,为实现航天器 X 射线脉冲星导航奠定了理论与实验基础。

2 改进后的 X 射线脉冲星脉冲轮廓探测系统及其工作原理

由于 X 射线脉冲星的 X 射线辐射非常微弱,星际背景很强,不但要求探测器有很高的探测灵敏度,而且要求探测器具有能量选择性,可以滤除很强的星际背景。改进后的基于微通道板(MCP)的 X 射线光子计数探测器,其探测系统的原理图如图 1 所示,主要包括模拟 X 射线脉冲星源、基于 MCP 的 X 射线光子计数探测器、时间测量系统和脉冲轮廓拟合 4 个模块。用模拟 X 射线源发射出的 X 射线经斩波器调制和衰减器衰减形成微弱的周期性脉冲信号,来模拟 X 射线脉冲星辐射出的信号。X 射线光子能量为 1~10 keV。通过调节 X 射线源的管流来调节 X 射线光子的强度,使探测器工作在光子计数模式。

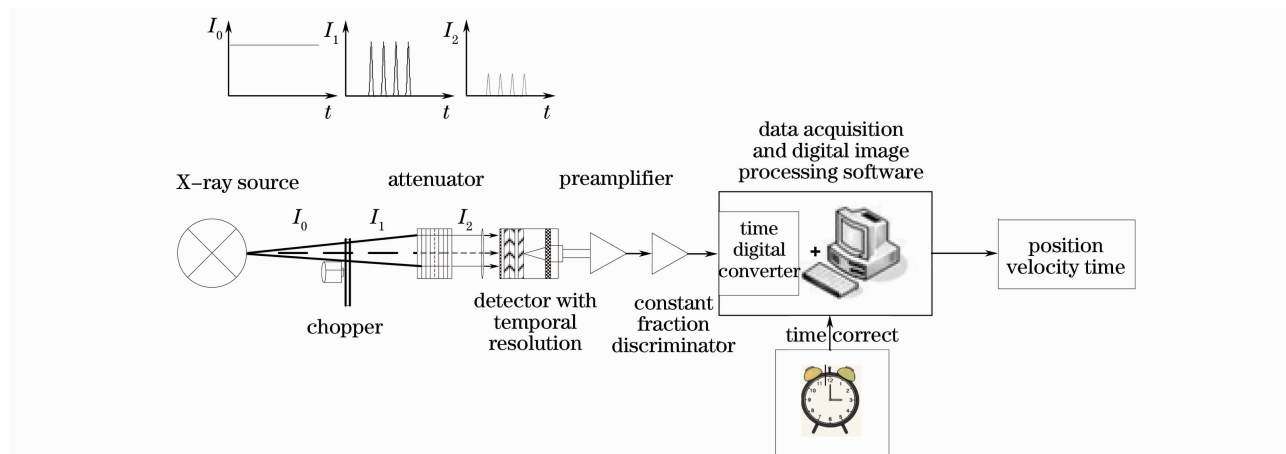


图 1 X 射线脉冲星脉冲轮廓探测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of pulse profile detection system for X-ray pulsar

将探测器放置在真空室内,真空度为 4.2×10^{-4} Pa。X 射线光子透过入射窗撞击光电阴极发生光电转换形成光电子,经 MCP 倍增形成电荷云,在加速电场的作用下撞击阳极并被阳极收集输出电荷信号。电荷信号经电流前置放大器(CSA)转化成电压信号,由恒比定时器(CFD)在每个电压脉冲的恒比点产生一个触发信号,这个恒比点所对应的时刻即认为是每个光子事件发生的时刻。触发信号触发时间数字转换器(TDC)记录下相距开始时刻系统时钟所经过的周期数,存于缓存中。经过一段时间积分,根据系统时钟周期将缓存中的一系列周期数矩阵转换成时间矩阵,然后根据已知的脉冲周期

拟合出脉冲轮廓。

2.1 改进型光子计数探测器

图 2(a)为基于 MCP 的改进型 X 射线光子计数探测器的示意图,图 2(b)为实物图。基于 MCP 的 X 射线光子计数探测器由输入窗、光电阴极、MCP 和阳极组成。在此探测器中将原来的 2 块 MCP 变成 3 块 MCP,且其中第 2 块和第 3 块 MCP 之间用石英介质隔开,2 块 MCP 分开加压,使得从第 2 块 MCP 输出的倍增电子能进入第 3 块 MCP 的更多通道,提高 X 射线光子计数探测器的增益。在本实验中,将镀有 50 nm 铝膜的 $1 \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺薄膜作

为入射窗^[7,8],使其对 1~10 keV 的 X 射线具有良好的透射率,又能有效抑制 1 keV 以下光子透过。为了获得高信噪比的 X 射线脉冲星的脉冲轮廓,提高脉冲到达时间 TOA 的测量精度,需要提高探测器输出信号的信噪比,高量子效率的光电阴极就是提高探测器输出信号信噪比的关键技术之一。比较 CsI 阴极和 Au 阴极在软 X 射线范围内的量子效

率,透射式 CsI 最优^[9]。因此在实验中采用透射式 CsI 阴极。当 MCP 工作在饱和增益时能获得最大信噪比。2 块 MCP 的增益大约在 $10^4 \sim 10^5$,3 块“Z”型叠加方式的 MCP,增益大约在 $10^6 \sim 10^7$,”Z”型叠加方式能有效地抑制离子反馈^[10~12]。在本模拟系统中主要研究 X 射线脉冲轮廓的探测,因此阳极为铜金属平板。

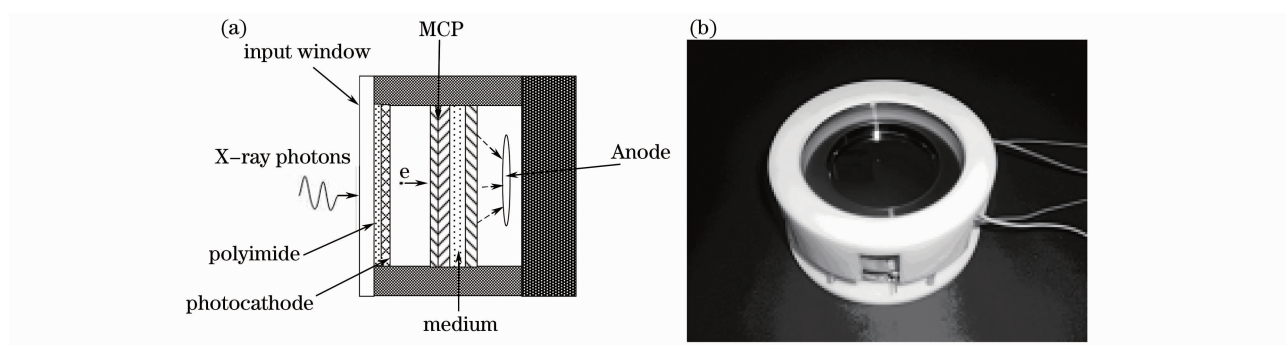


图 2 (a)基于 MCP 光子计数探测器示意图,(b)基于 MCP 光子计数探测器实物图
Fig. 2 (a) Schematic diagram of photon counting detector based on MCP, (b) setup of photon counting detector based on MCP

MCP 的电子渡越时间非常短,约为 1 ns,响应时间非常短,具有很高的时间分辨率^[13],满足 X 射线脉冲导航星光子计数探测器对响应时间和时间分辨率的要求。但是阳极与信号输出的同轴电缆的接法将影响探测器的输出信号波形。采用 $\Phi 10$ cm 悬浮的铜面板(即阳极面板未接地)作为收集阳极,在阳极与 MCP 输出面之间加 200 V 的加速电压,提高电荷收集效率。在阳极背面加一个背板,使得同轴电缆的地与探测系统的地相连接。图 3(a)为改进前探测器的输出波形。采用 MCP 快信号输出方案后,其探测器的输出波形如图 3(b)所示,具体的做法为在 MCP 负高压上并联一个皮法(pF)量级的滤波电容接地,滤除高频的毛刺,由于采用的同轴电缆特征阻抗为 50Ω ,为了达到阻抗匹配,防止输出信号在同轴电缆内部来回反射,造成输出信号振

荡,在阳极上接一个 50Ω 的电阻接地,去掉阳极的背板,同时减小阳极面板的面积,增大加速电压,使 MCP 的输出电荷在阳极面板上聚集。比较图 3(a)与(b)所示,图 3(a)中的输出信号下降沿很窄,上升沿很宽。减小示波器显示刻度,发现在一个主脉冲之后跟着一系列幅值逐渐减小的信号脉冲。这一系列信号脉冲有正有负。这是因为除了阻抗不匹配带来的波形振荡之外,阳极面板与背板之间形成一个大电容,测得其电容值为 $35 \mu\text{F}$,输出信号对阳极进行一个缓慢的充电过程,使得输出信号宽度大约在 $400 \mu\text{s}$,这极大地影响了探测器的时间分辨率,而且振荡也带来了更大的脉冲到达时刻的误差。图 3(b)中的输出信号为准高斯脉冲,脉冲宽度大约为 8 ns。这极大地提高了探测器的时间分辨率。另外,抑制了输出波形振荡,也有助于减小脉冲到达时间测量误差。

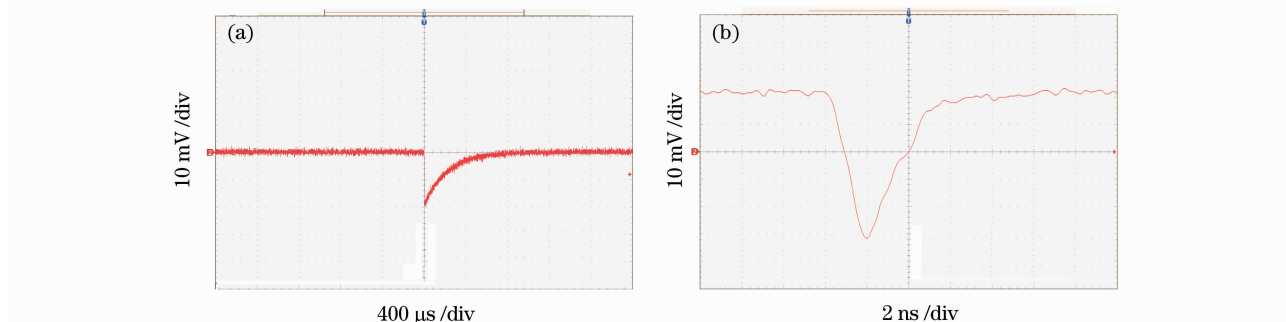


图 3 (a)改进前的探测器输出信号,(b)改进后探测器的输出信号
Fig. 3 (a) Output signal of detector before being improved, (b) output signal of detector after being improved

2.2 时间测量系统

时间测量系统由 CSA, CFD 和基于 FPGA 的 TDC 组成,其结构如图 4 所示。与改进之前的时间测量系统的差别在于定时系统用 CSA+CFD 的方案替代了电荷灵敏前置放大器+整形放大器+峰值定时鉴别器。探测器的输出信号经电荷灵敏前置放大器有一个积分过程,这将影响对信号到达时间的测量。另外峰值定时鉴别器输出的定时触发信号的脉宽大约为 $4\ \mu\text{s}$ 。改进之后的定时系统输出的触发脉宽大约为 $10\ \text{ns}$ 。改进后时间测量系统的工作过程为:探测器输出的准高斯型反向信号经 CSA 放大反向成正向信号,如图 5(a)所示。CSA 输出的信号在 CFD 内分两路,一路衰减一路延迟,分别输入快速比较器的同相端和反相端,在快速比较器同向端与反向端输入信号之差过零时,输出一个高电平脉冲,即在电压信号的上升沿的某一恒比点输出一个

触发信号,如图 5(b)所示。选择合适的衰减系数和延迟时间即可确定恒比点。选择合适的恒比点,不仅能消除由于幅度效应所带来的时间游动,还可以减小探测器的固有时间游动所带来的影响。为了与 TDC 触发信号的 LTTL 电平匹配,CFD 的输出信号经过电平转换成高电平为 $3.3\ \text{V}$ 的 LTTL 电平信号。TDC 用十六进制的数记录下触发信号上升沿到达时相对开始时间参考时钟所经过的周期数,并将记录下的数据压入 FIFO 缓存。周期性参考时钟信号经另一路 CFD,对时钟信号的上升沿进行校正,在第二路 CFD 上升沿到达一次,TDC 所记录的周期数加 1。由于 TDC 记录下的是相对的时间,因此引入标准的频率稳定的时钟信号,对 TDC 的测量结果进行修正并压入 FIFO 中。最后用串口调试助手将 FIFO 中的数据矩阵读入到计算机硬盘上。

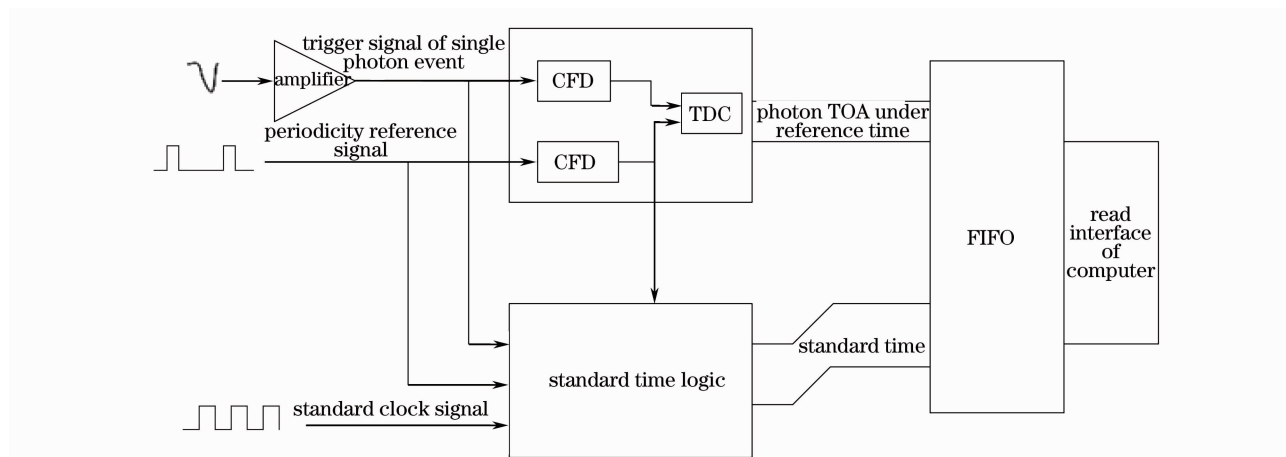


图 4 时间测量系统

Fig. 4 System of time measurement

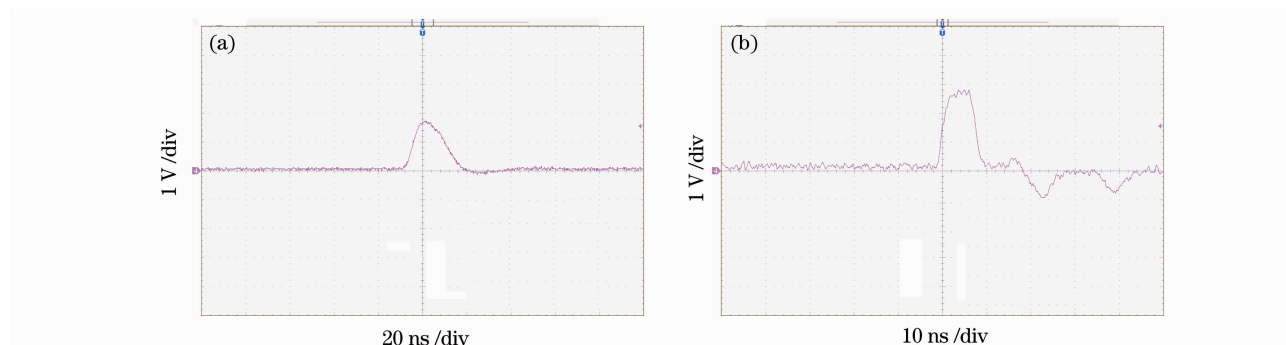


图 5 (a) 电流灵敏前置放大器的输出波形, (b) CFD 的输出波形

Fig. 5 (a) Output signal of CSA, (b) output signal of CFD

2.3 脉冲轮廓拟合

由于 X 射线脉冲星距离航天器非常遥远,到达搭载在航天器上的 X 射线探测器的 X 光子非常微弱,需要经过长时间(远大于 X 射线脉冲星的自转

周期)的积分。经过长时间的积分, FIFO 中存储了 TDC 的输出数据矩阵和标准时钟逻辑输出的数据矩阵,由时间计算模块根据已知的参考时钟周期,计算出光子时间信息矩阵,并存至计算机硬盘,最后由

Matlab 软件根据已知的脉冲周期拟合出脉冲轮廓。其具体过程是：将光子到达时间矩阵按照已知的脉冲周期分为 M 个周期，并将每一个周期等分成 N 等份，每一份称为一个 Bin，最后按照等相位原则将 M 个周期折合到一个周期中去，统计各个 Bin 中的光子数，即可得到 X 射线脉冲轮廓。当然在实际的 X 射线脉冲星导航系统中，在构造脉冲轮廓时还需要考虑到达时间转换，多普勒频移及脉冲周期随时间演化等的影响^[1]。

3 实验结果与讨论

实验中，调节脉冲周期为 150 ms，主峰与次峰之间间距为 1/4 周期的双脉冲的 X 射线脉冲星模拟源。通过调节管流来改变输入 X 射线光子的入射强度，利用示波器观测探测器输出的信号，当探测器输出信号为一系列离散的脉冲信号时，即可认为探测到的光子是一系列离散的单光子，这时可以通过长时间对单光子到达时间进行探测，记录下每个探测到的光子的到达时间，经过一定时间的积分，就可以重构出脉冲轮廓。决定 X 射线脉冲星导航精度的关键技术之一就是脉冲到达时间的测量精度，而脉冲到达时间测量精度决定于累积脉冲轮廓的信噪比^[14]：

$$\sigma_r = c \sigma_{\text{TOA}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{TOA}} = \frac{W}{2R_{\text{SN}}}, \quad (2)$$

$$R_{\text{SN}} = \frac{F_x A p_i t_{\text{obs}}}{\sqrt{[B_x + F_x(1 - p_i)](A t_{\text{obs}} d) + F_x A p_i t_{\text{obs}}}} = \frac{N_{\text{pul}}}{\sqrt{N_B + N_{\text{non-pul}} + N_{\text{pul}}}}, \quad (3)$$

式中 σ_r 为航天器的导航精度， σ_{TOA} 为 TOA 的测量精度， c 为一常数， R_{SN} 为探测的 X 射线脉冲星脉冲轮廓的信噪比， F_x 为 X 射线光子流量， A 为探测器面

积， P_i 辐射百分比， t_{obs} 为观测时间。 B_x 为 X 射线背景辐射流量，占空比 d 可以表示为脉冲宽度 W 与脉冲周期 P 之比，即 $d = W/P$ ， N_{pul} 为脉冲部分光子数， $N_{\text{non-pul}}$ 为非脉冲部分光子数， N_B 为占空比 d 内背景辐射的光子数。根据(3)式，比较改进前后探测系统所探测到的 X 射线脉冲轮廓。

3.1 改进前后探测系统脉冲轮廓的比较

图 6 为改进前后探测系统探测拟合出的脉冲轮廓。实验条件为模拟 X 射线脉冲星源离探测器 1 m，管压 8 keV，管流 30 μA ，每块 MCP 加压 -700 V，Bin 的大小为 1.5 ms，积分 200 s。比较图 6(a)，(b)，图 6(b) 中的脉冲轮廓信噪比优于图 6(a)。这是因为改进后的探测系统电子增益更大，单位时间探测到的光子数多，时间测量系统的所能达到的计数率更高，因而探测到脉冲轮廓信噪比更优。积分时间能够影响脉冲轮廓的信噪比，积分时间越长，脉冲轮廓的信噪比越高。因此改进后的探测系统提高了探测效率，有助于提高导航精度和实时性。

3.2 MCP 的增益

改变 MCP 的电压，其他实验条件保持不变，研究 MCP 增益对探测系统脉冲轮廓的影响。用改进后的探测系统获得不同 MCP 电压下的脉冲轮廓如图 7 所示。图 7(a) 中 3 块 MCP 的总电压为 -1800 V，图 7(b) 中 3 块 MCP 的总电压为 -2400 V，积分时间为 200 s。比较图 7(a)，7(b) 和图 6(b)，其主峰高度依次为 300，580 和 620，次峰高度依次为 320，420 和 450，由于 MCP 上所加的电压不同将影响探测器的增益，当 MCP 的工作电压为 -1800 V，即每块 MCP 所加电压为 -600 V 时，探测器的信噪比较低，当对脉冲轮廓高度进行归一化时，脉冲轮廓的信噪比较低。当增加 MCP 的工作电压时，脉冲轮廓的信噪比提高。当 MCP 的工作电压提高到每块

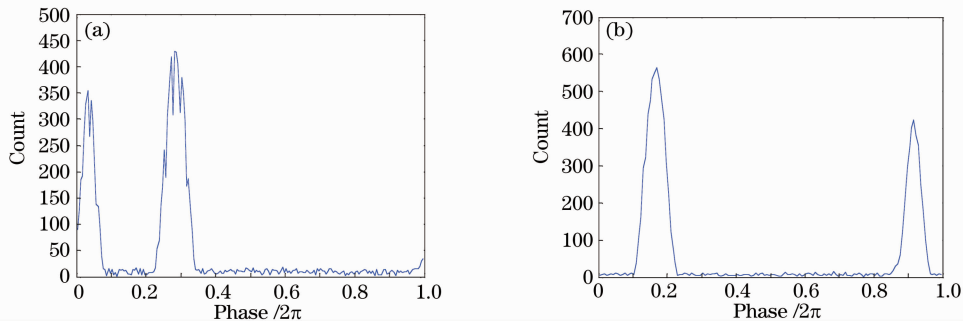


图 6 不同探测系统拟合出的脉冲轮廓。(a)改进前探测系统拟合出的脉冲轮廓，(b)改进后探测器系统拟合出的脉冲轮廓

Fig. 6 Pulse profile fitted by different detection systems. (a) pulse profile fitted by detection system before being improved, (b) pulse profile fitted by detection system after being improved

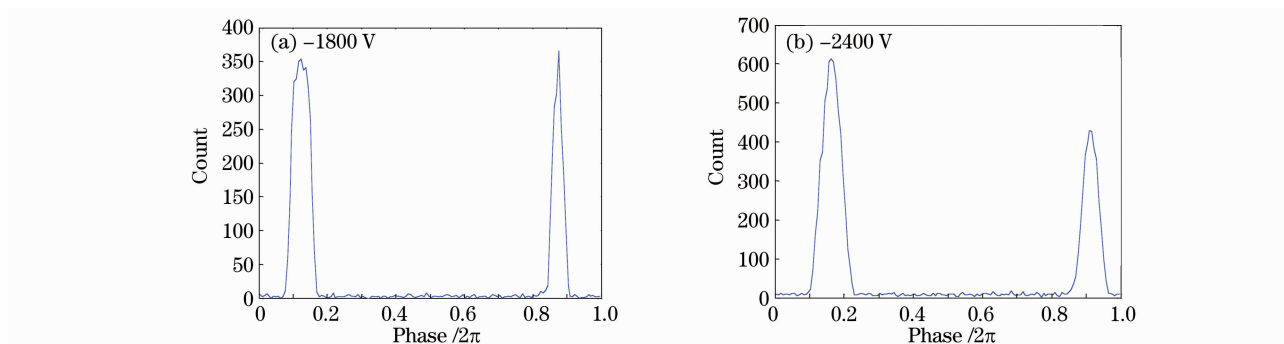


图 7 不同 MCP 电压拟合出的脉冲轮廓

Fig. 7 Pulse profiles fitted at different voltages on MCP

-800 V 时, MCP 工作在饱和增益, 此时信噪比最高。

4 结 论

本文对 X 射线脉冲星导航系统的地面模拟样机进行了改进, 采用了 3 块 MCP“Z”型叠加方式, 且 2 片 MCP 分开加压, 提高了 MCP 的增益, 进而提高了信噪比, 同时改进了阳极的结构与信号输出方式, 采用快响应的电子读出系统, 使其具有高响应速率和高时间分辨率。结合脉冲轮廓拟合软件处理系统, 完成 X 射线脉冲星地面模拟系统的脉冲轮廓拟合, 根据 TOA 算法即可实现脉冲达到时间的测量。根据脉冲轮廓探测信噪比的公式, 比较改进前后探测系统的性能以及 MCP 增益对改进后探测系统的性能的影响。得出了该改进后的探测系统在每块 MCP 电压为 -800 V, Bin 值为 1.5 ms, 积分 200 s 后可获得较好信噪比的脉冲轮廓的结论。

参 考 文 献

- J. H. Taylor. Millisecond pulsars: nature's most stable clocks [C]. Proc. IEEE. Las Vegas, 1991, 1054~1062
- Yang Tinggao. Using pulsar clocks as time scale for spacecraft [J]. *J. Time and Frequency*, 2007, **30**(2): 125~131
杨廷高. 用脉冲星作航天器时间标准[J]. *时间频率学报*, 2007, **30**(2): 125~131
- Paul S. Ray, Suneel I. Sheikh, Paul H. Graven *et al.*. Deep space navigation using celestial X-ray sources [C]. Proc. Ion NTM 2008, San Diego, CA, 2008, 101~109
- Shuai Ping. The X-ray pulse navigation scheme of America and its implications[J]. *Space International*, 2006, (7): 7~10
帅平. 美国 X 射线脉冲星导航计划及其启示[J]. *国际太空*, 2006, (7): 7~10
- Shuai Ping, Chen Shaolong, Wu Yifan *et al.*. Advance in X-ray pulsar navigation technology [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, (2): 169~176
帅平, 陈绍龙, 吴一帆等. X 射线脉冲星导航技术进展[J]. *空间科学学报*, 2007, (2): 169~176
- P. S. Ray, K. S. Wood, B. F. Philips. Spacecraft navigation using X-ray pulsars [J]. *J. Guid. Cont. & Dyn.*, 2006, **29**(1): 49~63
- Filter Transmission [DB/DL]. [2010-12-05] http://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html
- R. M. Rideout, J. F. Pearson, G. W. Fraser *et al.*. X-ray-induced radiation damages in CsI, Gadox, Y₂O₂ and Y₂O₃ thin film [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2001, **549**(3): 543~551
- A. S. Tremsin, O. H. W. Siegmund. Heat enhancement of radiation resistivity of evaporated CsI, KI and KBr photocathodes [J]. *Nucl. Instr. Meth.*, 2000, **A442**: 337~341
- Feifei Zhao, Baosheng Zhao, Xiaofeng Sai *et al.*. Influence of annealing temperature on the performances of Ge film and photon counting image system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 361~364
- Xinghua Zhang, Baosheng Zhao, Zhenhua Miao *et al.*. Correction of ultraviolet single photon counting image distortion [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 661~664
- Gu Mu, Wang Di, Ni Chen *et al.*. A pulsed X-ray facility for fluorescent lifetime measurement based on micro-channel plate photomultiplier tube [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 813~816
顾牧, 王迪, 倪晨等. 一种基于微通道板的脉冲 X 射线时间谱仪[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 813~816
- L. W. Joseph. Micro-channel plate detector [J]. *Nucl. Instr. & Meth.*, 1979, **142**: 587~601
- G. W. Fraser. X-Ray Detectors in Astronomy [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989