

X 射线脉冲星导航系统导航精度的研究*

王朋^{1)2)†} 赵宝升¹⁾ 盛立志¹⁾ 胡慧君¹⁾²⁾ 鄢秋荣¹⁾

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)

(2012 年 2 月 21 日收到; 2012 年 4 月 5 日收到修改稿)

为提高 X 射线脉冲星导航系统的导航精度, 提出了一种基于低通滤波器的恒比定时方法, 以提高 X 射线脉冲星导航系统中 X 射线脉冲到达时间的测量精度. 通过设计测量方案, 对原有的峰值定时方法和改进后的恒比定时系统的定时精度和死时间进行测量. 测量结果表明, 峰值定时系统的定时精度和死时间分别为 18 和 4750 ns, 恒比定时系统的定时精度和死时间分别为 0.78 和 105 ns, 与原有的峰值定时系统相比, 采用恒比定时系统的定时精度和死时间均得到明显的提高. 在 X 射线脉冲星导航系统中, 通过利用这两种不同定时系统来测量 X 射线光子的到达时间以构造累积脉冲轮廓. 实验结果表明, 与峰值定时系统相比, 采用改进的恒比定时系统获得的累积脉冲轮廓的信噪比得到明显改善, 因此, 采用恒比定时系统的导航精度可得到提高.

关键词: 探测器, X 射线脉冲星导航, 定时精度, 死时间

PACS: 97.60.Gb, 07.85.-m, 07.05.Fb

1 引言

1967 年, 剑桥大学卡文迪许实验室的贝尔博士发现了第一颗脉冲星^[1]. 脉冲星最主要的特点就是周期非常稳定, 特别是周期为毫秒量级的脉冲星的周期变化率为 10^{-19} — 10^{-21} , 可与目前最稳定的铯原子钟相媲美^[2,3]. 由于脉冲星具有非常高的稳定度, 因此脉冲星可以应用于星际间航天器的导航. 对于 X 射线脉冲星导航的实质性研究始于美国国防部国防预先研究项目局 (DARPA) 于 2004 年初提出的“基于 X 射线源的自主导航定位验证”计划, 该计划由马里兰大学的资深教授皮恩斯博士全面负责^[4,5]. 其主要目标是验证应用 X 射线源实现地球轨道航天器自主导航的可行性. 在美国的带动下, 世界各国相继开展了 X 射线脉冲星导航的研究工作. 其中中国科学院西安光机所亦搭建了基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统, 并通过该系统对 X 射线脉冲星导航的 X 射线探测器和累积脉冲轮廓

的信噪比进行了研究^[6,7]. 由于决定 X 射线脉冲星导航系统的导航精度的关键技术之一就是 X 射线脉冲到达时间的测量精度^[8], 而 X 射线脉冲到达时间的测量精度决定于累积脉冲轮廓的信噪比. 其中累积脉冲轮廓的构造主要通过测量单个 X 射线光子的到达时间, 并根据 X 射线脉冲星的脉冲周期, 经过一定时间的积分将光子到达时间进行历元叠加所得到的^[9]. 所以 X 射线脉冲星系统的导航精度依赖于单个 X 射线光子到达时间的测量精度. 因此利用已有的 X 射线脉冲星导航系统来研究不同的定时系统对单个 X 射线光子到达时间的测量精度、不同定时系统对拟合出的累积脉冲轮廓信噪比和导航精度的影响.

本文通过提出一种基于低通滤波器来实现恒比定时的方法, 改进了测量 X 射线脉冲到达时间的测量系统. 从 X 射线脉冲到达时间的定时精度和死时间两个方面来衡量不同定时系统的时间测量精度, 并得到两种不同定时系统的 X 射线累积脉冲轮廓图.

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11103069, 61007017) 资助的课题.

† E-mail: s09046@opt.cn

2 系统工作原理及其改进方法

图 1 所示为 X 射线脉冲星导航系统的工作原理. 由模拟 X 射线球管、微通道 (MCP) 探测器、时间测量单元、计算机处理单元所组成. X 射线入

射到 MCP 探测器表面, 并经光电效应产生光电子, 光电子经过 MCP 倍增后被阳极收集^[10]. 阳极收集到的电子经过后端的时间测量单元记录下每个 X 射线光子的到达时间, 并由计算机处理单元对测量到的每个 X 射线光子到达时间进行处理.

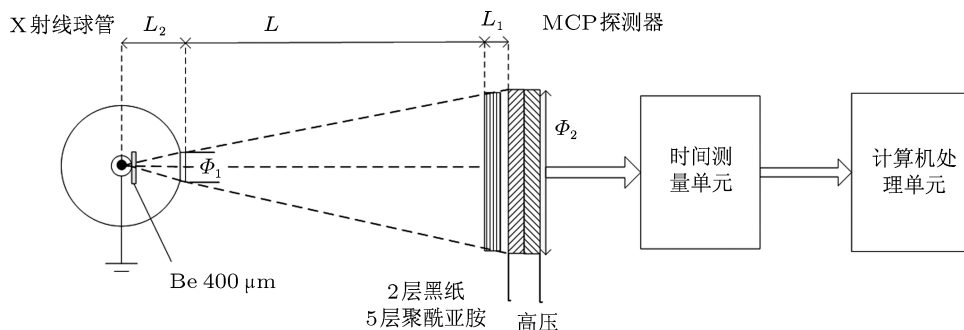


图 1 X 射线脉冲星导航系统的工作原理

利用单个 X 射线光子到达时间的测量数据, 并根据 X 射线脉冲星累积脉冲轮廓的构造方法对其轮廓进行构造. X 射线脉冲星的脉冲轮廓构造的方法为: 设采集时间为 N 个周期, 每个周期分为主、次两个脉冲并且将每个周期分为 M 个等份, 每个等份称为一个时间区间 (bin); 根据脉冲周期将每个周期中光子到达的时间换算为同一个周期中的某一个 bin 中, 并将 bin 中的光子数加 1, 按照此方法将 N 个周期中的光子达到时间都换算为同一周期的 bin 中, 最后根据每个 bin 中光子数目构造出脉冲轮廓, 如 (1) 式所示:

$$f_m(t) = \sum_{i=1}^N \delta(m - n), \quad (1)$$

其中 $f_m(t)$ 为第 m 个 bin 中的光子数, $m = 1, 2, \dots, M$, $\delta(m - n)$ 表示在第 i 个周期的脉冲光子事件是否在第 m 个 bin 中, 即

$$\delta(m - n) = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ 1 & m = n \end{cases},$$

$n = 1, 2, \dots, M$ 表示第 i 个周期的脉冲所处的第 n 个 bin 内.

从上述的累积脉冲轮廓的构造方法可知, 要准确地构造出累积脉冲轮廓, 就必须准确地测量每个 X 射线光子的到达时间. 原有的时间测量单元主要是基于采样保持芯片的峰值检测定时系统, 峰值定时系统包括电荷灵敏前置放大器、整形放大

器、峰值定时电路. 峰值定时系统引起的定时晃动主要由两个方面组成: 由于探测器出来的脉冲信号在经过前置放大和整形电路之后脉冲会展宽, 即脉冲宽度由原来的 4 ns 展宽为 8 μ s, 所以导致在峰值定时系统对峰值的甄别会出现晃动比较大; 由于探测器出来的脉冲信号的幅度会有有一定的变化, 使得经过放大后信号的上升时间会发生变化, 所以采用峰值定时系统时上升时间也会引起时间的晃动. 为了解决实验中峰值定时系统的这些缺陷, 本文提出了一种新的时间测量系统, 即恒比定时系统. 与峰值定时不同的是其前端采用电流灵敏前置放大, 所以放大后的脉冲宽度更窄, 能有效地消除峰值甄别时出现的时间晃动; 由于恒比定时利用恒比点的方式触发定时时间, 这就能有效地消除脉冲上升时间不同所引起的时间晃动. 采用低通滤波器来实现恒比定时^[11]的原理如图 2 所示 (若是用高通滤波器来实现恒比定时, 则需将减法器的两个输入端位置互换). 从输入端到减法器输出端之间的传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{(1 + s\tau)^n} - f = \frac{1 - f(1 + s\tau)^n}{(1 + s\tau)^n}, \quad (2)$$

传递函数 (2) 式有一个零点, 因此这种传递函数能将单极性信号转化为双极性信号. 由于这是个线性网络, $V_3(t)$ 的过零时刻与信号的幅度没有关系. 对

于前沿线性上升的信号, 还能实现幅度和上升时间补偿, 使得定时时刻与信号的幅度和上升时间无关.

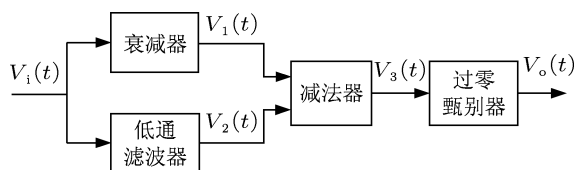


图2 采用低通滤波器实现的恒比定时器的原理

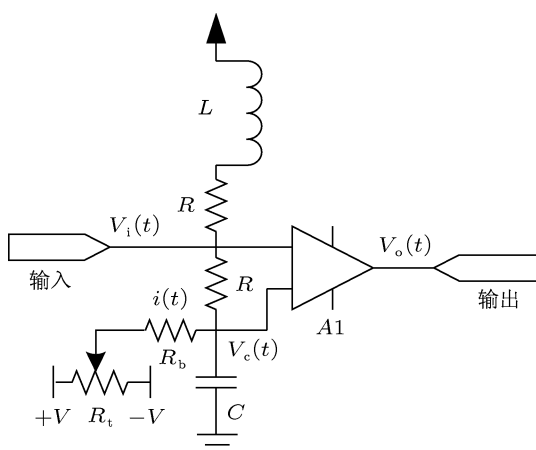


图3 采用一阶低通滤波器实现的恒比定时电路

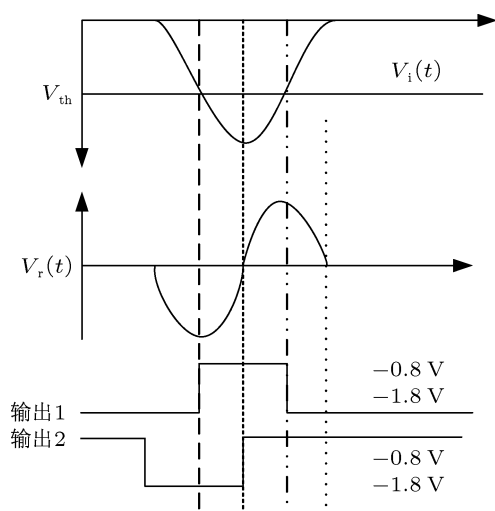


图4 恒比定时与阈值甄别电路工作波形

在本实验平台中采用的定时电路 (一级低通滤波器实现) 原理和工作波形分别如图3和图4所示. 此时输入信号 $V_i(t)$ 与比较器的同相端相连, 低通滤波器的输出 $V_c(t)$ 与比较器的反相端相连. 则比较器同向端与反相端输入电压之差 $V_r(t)$ 为

$$V_r(t) = V_i(t) - V_c(t) = RCdV_c(t)/dt, \quad (3)$$

在电容器上的电压到达阈值后, 电阻 R 上的电流方向发生变化, 引起比较器翻转. 由于电阻和电容构成的是线性网络, $V_r(t)$ 过零时刻与输入信号的幅度没有关系, 从而实现了恒比定时的功能.

3 定时系统时间精度的测量

基于MCP的X射线脉冲星导航系统对单个X射线光子的定时精度与MCP探测器的固有时间晃动和电子学的时间晃动有关^[12,13], 即

$$\Delta T = \sqrt{\Delta t_D^2 + \Delta t_E^2}, \quad (4)$$

其中, Δt_D 为X射线探测器的固有时间晃动, Δt_E 为电子学的时间晃动. MCP本身的时间分辨为各部分时间弥散之和, 包括光阴极-MCP的时间弥散、电子在MCP内部的渡越时间弥散、MCP-阳极的时间弥散. MCP自身的特性, 如通道孔径、斜切角、MCP增益等, 均影响电子在MCP内的渡越时间弥散, 也是影响探测器时间分辨的主要因素. 通常在单块MCP中电子通过的时间为500 ps以内. 由于探测器的固有时间晃动在实验条件下一般固定不变, 因此需主要研究不同时间测量系统对单个X射线光子到达时间的测量精度.

为了测量两种不同的定时系统的定时精度和死时间, 在实验中设计了测量定时精度的方法. 两种不同定时系统的定时精度测试方案原理如图5所示: 信号发生器输出的 (峰值定时系统) 或三角波信号 (恒比定时系统) 进入定时系统, 输出的定时信号作为时幅转换器 (TAC) 的开始信号, 信号发生器输出的晶体管-晶体管逻辑电平 (TTL) 信号经过延迟输出作为TAC的停止信号. TAC将输入的开始信号和停止信号的时间间隔转换为与之成正比的电压幅度输出. 输出的电压由多通道分析仪接受, 利用多道分析仪可计算出TAC的输出电压谱 (即读出电子学的时间谱), 该分布符合高斯分布, 利用高斯函数拟合得到定时精度的测量结果.

利用图5所示的测量方案分别对峰值定时系统和恒比定时系统的定时精度进行测量, 结果如图6所示.

从图6(a)中可以看出峰值系统的定时精度的脉冲时间谱高斯拟合均方差为7.8 ns, 时间分辨 Δt_E 的半峰全宽为18 ns; 从图6(b)中可以看出, 恒比定时系统的定时精度的脉冲时间谱高斯拟合均方差为0.37 ns, 则可知恒比定时系统的定时精度

为 0.78 ns.

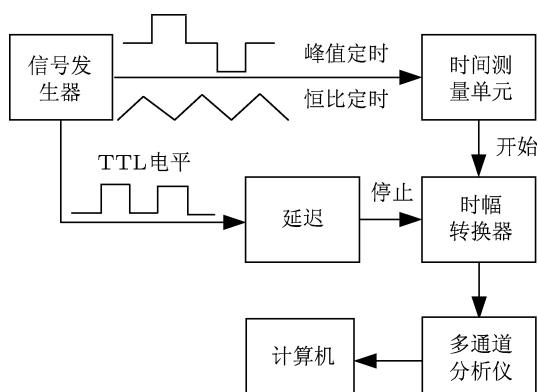


图5 定时系统的时间精度测试示意图

探测系统包括 MCP 光子计数探测器、定时电路、数据采集系统和数据处理与脉冲轮廓拟合系统. 事件的产生到信号进入时间信息分析电路之间, 大体上需经过 X 射线光子到达探测器表面、探测器被击中、探测器信号输出、电子学电路信号处理、时间电路检出信号送到时间数字转换

器 (TDC) 输入端等过程. 由于定时电路的死时间不能独立测量, 需要借助于数据采集系统. 本实验利用探测器输出的信号作为测量信号, 因此此时的测量结果即为探测器、定时电路和数据采集系统组成系统之后的死时间. 在探测器系统的死时间内, 无法识别下一个光子事件, 因此探测系统的死时间影响系统的有效计数率. 本实验利用相同的光子计数探测器、数据采集系统, 比较使用不同定时电路对系统死时间的影响. 具体方法为 X 射线光子进入探测器并输出电荷信号, 当电荷信号被定时电路甄别并输出定时脉冲时, 用数据采集系统根据标准时钟逻辑里的时钟周期对定时信号进行标记存储. 该实验采集的是一系列以开始时刻为 0 并沿时间轴的点 (十六进制表示), 并将其转换为十进制. 将相对时间序列相邻事件发生的时间间隔进行一个统计处理, 就得到整个探测系统的死时间.

利用设计的测试定时系统的死时间方案分别对峰值定时系统和恒比定时系统的死时间进行测量, 如图 7 所示.

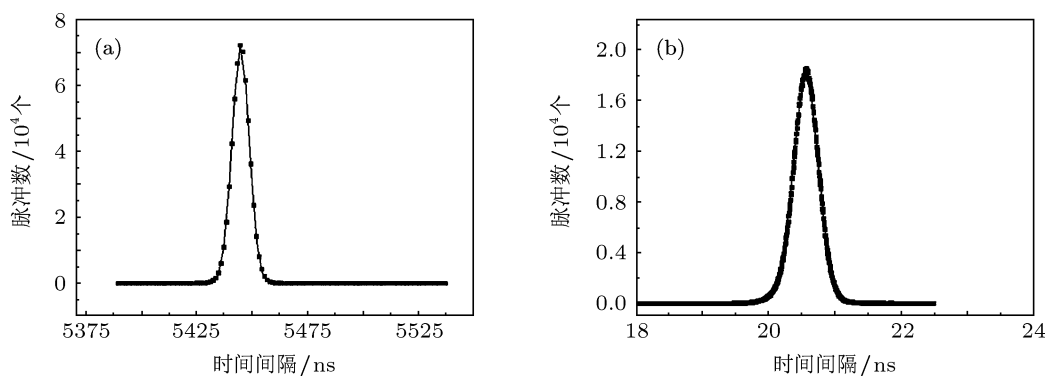


图6 不同定时系统的定时精度 (a) 峰值定时系统的定时精度; (b) 恒比定时系统的定时精度

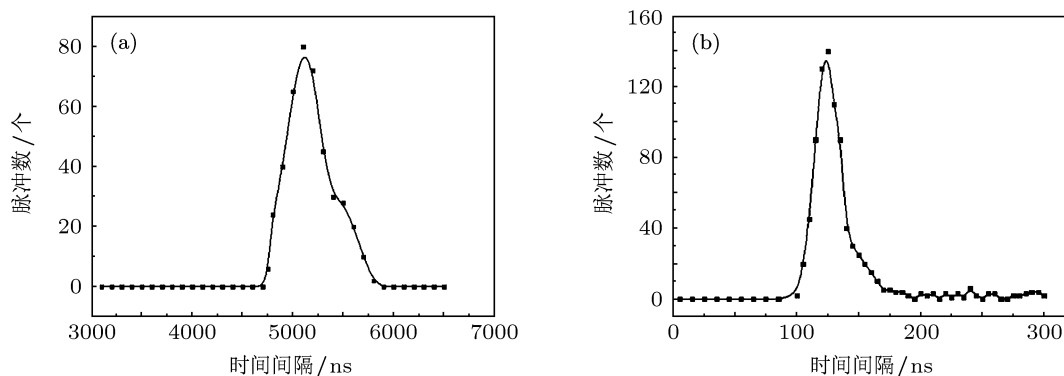


图7 不同定时系统的死时间曲线 (a) 峰值定时系统; (b) 恒比定时系统

从图 7(a) 中可以知道, 采用峰值定时方案时在大约 4750 ns 的时间间隔以内计数为零, 即两个相邻的 X 射线光子的入射时间间隔在这一时间范围内系统是无法分辨出来的, 因此认为峰值定时系统的系统死时间为 4750 ns. 同理得到恒比定时系统的死时间为 105 ns.

4 X 射线脉冲轮廓的构造

图 8 是根据表达式 (1) 式所示的 X 射线脉冲星累积脉冲轮廓的构造方法, 通过对每个 X 射线光子到达时间的测量并利用自编的软件对采用峰值定时系统图 8(a) 和恒比定时系统图 8(b) 的 X 射线累积脉冲轮廓进行构造所得到的 X 射线轮廓图 (其他实验条件和环境不变的前提下所测量出的结果).

从图 8 中可以看出, 采用恒比定时系统拟合出的脉冲轮廓的信噪比 (SNR) 明显优于采用峰值定时系统的累积脉冲轮廓图. 由于累积脉冲轮廓图的

构造是由对单个 X 射线光子的到达时间的测量数据, 根据入射 X 射线光子的标准周期叠加起来的, 由于采用恒比定时系统的时间测量精度更高, 所以当对测量到的 X 射线光子到达时间进行拟合时, 经过一段时间的叠加, 其每次测量的 X 射线光子到达时间的时间晃动比采用峰值定时系统要小, 其时间周期性也比峰值定时系统更加准确, 因此拟合出的脉冲轮廓信噪比较好.

在 X 射线脉冲星导航中决定导航精度的主要因素是脉冲到达时间 (TOA) 的精度, 而 TOA 的精度取决于脉冲轮廓的信噪比^[14], 如下所示:

$$\sigma_r = c\sigma_{\text{TOA}} = \frac{cW}{2\text{SNR}}, \quad (5)$$

其中, σ_r 为航天器的导航精度误差, σ_{TOA} 为 TOA 的测量精度误差, c 为一常数, SNR 为探测的 X 射线脉冲星脉冲轮廓的信噪比. 因此根据 (5) 式对 X 射线脉冲星导航系统的导航精度的定义可知, 采用恒比定时系统的导航精度比采用峰值定时系统的导航精度更高.

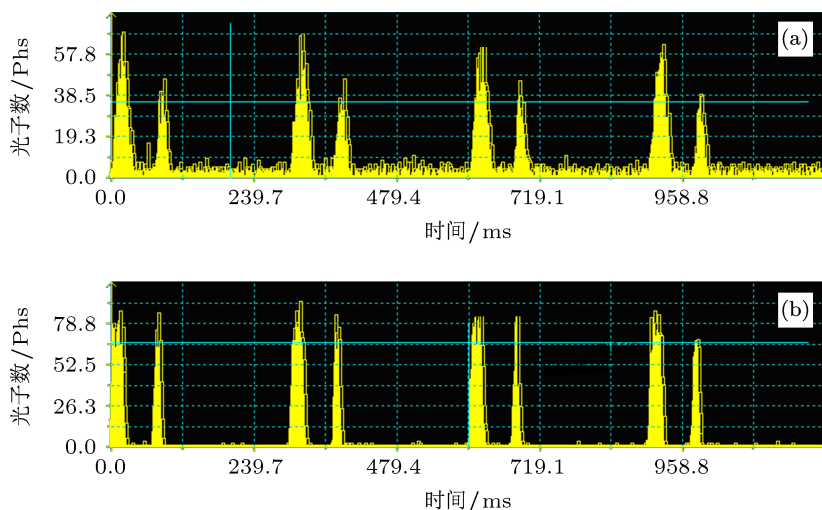


图 8 不同定时系统的累积脉冲轮廓图 (a) 峰值定时系统; (b) 恒比定时系统

5 结 论

改进了测量 X 射线脉冲到达时间的测量系统, 对改进前后的两种不同的定时系统的定时精度和死时间进行了测量, 并利用这两种不同的定时系统测量了 X 射线光子的到达时间, 构造了 X 射线脉冲的累积脉冲轮廓. 实验表明, 改进后的测量系统中定时精度和死时间都得到了大幅的提高, 定时

精度从原来的 18 ns 提高到 0.78 ns, 死时间从原来的 4750 ns 提高到 105 ns. 采用恒比定时系统的累积脉冲轮廓的信噪比明显优于峰值定时系统, 因此采用恒比定时系统有利于导航精度的提高. 研究结果对于提高整个导航系统的导航精度具有非常重要的作用, 同时也对 X 射线脉冲星导航的后续研究具有非常重要的意义.

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, Scott P F, Collins R A 1968 *Nature* **217** 709
- [2] Taylor J H 1991 *Proc. IEEE* **79** 1054
- [3] Nicastrro L, Cusumano G, Lohmer O, Kramer M, Kuiper L, Hermesen W, Mineo T, Becker W 2004 *Astron. Astrophys.* **413** 1065
- [4] Paul S R, Kent S W, Michael T W, Suneel I S, Kathryn W 2007 *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Institute of Navigation* Cambridge, UK April 23–25, 2007 p423
- [5] Sheikh S I, Ray P S 2007 *Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Institute of Navigation* Cambridge, UK April 23–25, 2007 p444
- [6] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029701 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 鄢秋荣 2011 物理学报 **60** 029701]
- [7] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Sai X F, Yan Q R, Chen B M, Wang P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 019701 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 赛小锋, 鄢秋荣, 陈宝梅, 王朋 2012 物理学报 **61** 019701]
- [8] Xie Z H, Xu L P, Ni G R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6683 (in Chinese) [谢振华, 许录平, 倪广仁 2008 物理学报 **57** 6683]
- [9] Ray P S, Wood K S, Philips B F 2006 *Guid. Cont. Dyn.* **29** 49
- [10] Liu Y A, Yan Q R, Sheng L Z, Zhao F F, Hu H J, Zhao B S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 048501 (in Chinese) [刘永安, 鄢秋荣, 盛立志, 赵菲菲, 胡慧君, 赵宝升 2011 物理学报 **60** 048501]
- [11] Tanaka M, Ikeda H, Ikeda M, Inaba S 1992 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **39** 1321
- [12] Gu M, Wang D, Ni C, Liu X L, Huang S M, Liu B 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 813 (in Chinese) [顾牧, 王迪, 倪晨, 刘小林, 黄世明, 刘波 2008 光学学报 **28** 813]
- [13] Va'vra J, Benitez J, Leith D W G S, Mazaheri G, Ratcliff B, Schwiening J 2007 *Phys. Res. A* **572** 459
- [14] Sheikh S I, Pines D J 2006 *J. Guid. Control Dynam.* **29** 49

Research of the navigation accuracy for the X-ray pulsar navigation system*

Wang Peng^{1)2)†} Zhao Bao-Sheng¹⁾ Sheng Li-Zhi¹⁾ Hu Hui-Jun¹⁾²⁾ Yan Qiu-Rong¹⁾

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)

(Received 21 February 2012; revised manuscript received 5 April 2012)

Abstract

In order to improve the navigation accuracy of the X-ray pulsar navigation system, in this paper we propose a constant fraction timing method based on the low-pass filter to measure the arrival time of the X-ray pulse in X-ray pulsar navigation. According to the technical scheme, the timing accuracies and dead times of original peaking timing and the improved constant fraction timing are measured. Experimental results indicate that the timing accuracy and the dead time of the peaking timing system are 18 ns and 4750 ns, the timing accuracy and the dead time of the constant fraction timing system are 0.78 ns and 105 ns. The timing accuracy and the dead time of constant fraction timing system are significantly improved compared with those of the peaking timing system. In the X-ray pulsar navigation system, the cumulative pulse profile of the X-ray pulse is constructed in the two different timing systems through measuring the arrival time of the X-ray photon. Experimental results indicate that compared with using the peaking timing system, the cumulative pulse profile of the X-ray pulse using the improved constant fraction timing system is improved obviously, therefore, the navigation accuracy could be improved by using the constant fraction timing system.

Keywords: detectors, X-ray pulsar navigation, timing accuracy, dead time

PACS: 97.60.Gb, 07.85.-m, 07.05.Fb

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11103069, 61007017).

† E-mail: s09046@opt.cn