

基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统研究

胡慧君^{1) 2)†} 赵宝升¹⁾ 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, 西安 710119)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010 年 6 月 29 日收到; 2010 年 7 月 15 日收到修改稿)

为进行 X 射线脉冲星导航的关键技术研究, 搭建了基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统. 地面模拟系统由模拟 X 射线脉冲源、基于微通道板的高灵敏 X 射线光子探测器、电荷灵敏前放和主放电路、时间测量单元、X 射线脉冲轮廓构造及 X 射线脉冲到达时间测量系统组成. 该模拟系统可在地面模拟 X 射线脉冲星导航的星源的强度、周期及脉冲轮廓, 实现对 X 射线脉冲星单光子到达时间的记录, 构造 X 射线脉冲星脉冲轮廓, 计算 X 射线脉冲到达时间. 描述了基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统的组成和工作原理, 报道了基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统的初步结果.

关键词: X 射线脉冲星导航, 微通道板光子探测器, 脉冲轮廓

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

1. 引言

1982 年毫秒脉冲星 PSRB1937 + 21 的发现, 证明毫秒脉冲星自转频率非常稳定, 其频率稳定性足以和现代原子钟相媲美, 可作为一种天体钟^[1], 为空间飞行提供导航信标. 基于 X 射线脉冲星的自主导航方法是一种新型航天器自主导航技术, 该技术通过探测深空脉冲星的 X 射线脉冲进行精确的位置计算, 实现航天器高精度自主导航和运行管理, 不需要地面站的支持. 2003 年 Sheikh 等^[2]初步论证了基于 X 射线脉冲星的航天器自主高精度轨道确定的可行性, 掀起了 X 射线脉冲星导航研究的热潮, 2004 年美国国防部国防高级研究计划局 (DARPA) 启动了“基于 X 射线源的自主导航定位”研究计划. X 射线脉冲星导航的关键技术之一是研制具有单光子分辨能力的 X 射线光子计数探测器. 目前已知的 X 射线探测器有正比计数器、微通道板 (MCP)、电荷耦合器件 (CCD) 及量热计型 X 射线探测器. 决定 X 射线脉冲星导航精度的因素是脉冲到达时间的测量误差, 而 MCP 相比于其他类型的探测器响应时间快, 可达纳秒量级, 时间分辨率高, 可达几十皮秒量级, 完全满足 X 射线脉冲星导航系统的

时间分辨需求. 另外, 对于在轨运行的探测器, 使用寿命是值得考虑的一个重要因素. 正比计数器由于真空中漏气, CCD 易被地球周围的粒子流损坏, 量热计受所能携带的制冷剂的数量限制, 有效使用寿命受限, 而 MCP 可避免这些不利因素, 有效使用寿命较长^[3]. 再则, MCP 探测器技术相对成熟、信噪比高、探测灵敏度高、背景噪声低、速度快、动态范围宽. 因此, 选用 MCP 探测器搭建了 X 射线脉冲星导航地面模拟系统, 用以研究 X 射线脉冲星导航的关键技术, 如 X 射线探测器的标定、脉冲相位的测量、脉冲到达时间 (TOA) 的确定及导航算法的验证等.

本文详细介绍了基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统的组成和工作原理, 报道了该模拟系统的初步实验结果, 对影响脉冲轮廓信噪比的因素进行了分析.

2. 系统组成和工作原理

基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统的组成如图 1 所示. 图 1(a) 为系统原理图, 图 1(b) 为实物图, 主要由 X 射线脉冲辐射源、X 射线光子计数探测器、电子读出系统和数据处理四部分组成.

† E-mail: huhuijun@opt.ac.cn

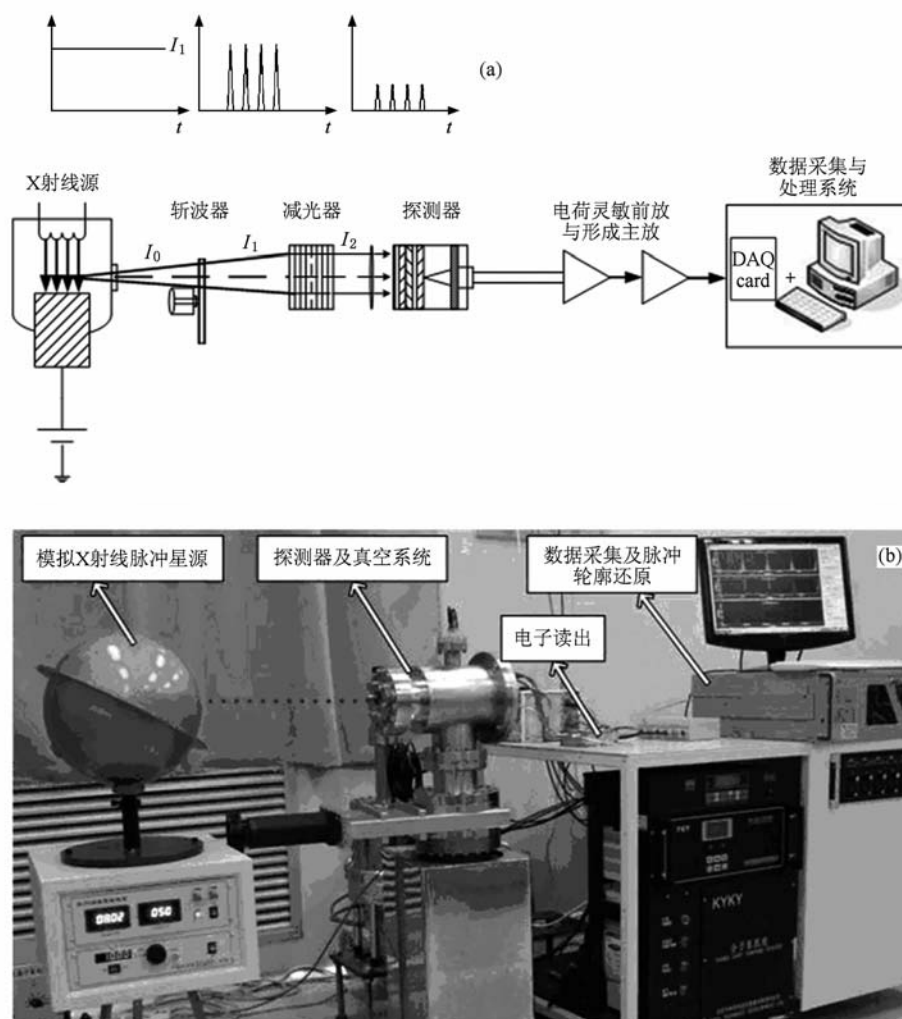


图1 基于X射线脉冲星导航的地面模拟系统 (a)原理图, (b)地面模拟系统实物图

2.1. 模拟X射线脉冲源

模拟X射线脉冲源主要由X射线球管、斩波器及相应的低压、高压电源组成。X射线球阴极接负高压,阳极接地。灯丝附近装有控制栅,使灯丝发出的热电子在电场的作用下聚焦轰击靶面。当灯丝通电加热至高温时,大量的热电子产生,在极间高压作用下高速轰击靶面使其动能部分转变为辐射能,以X射线的形式释放。在X射线球管出口放置斩波器,在一定转速下将连续光调制成一定频率的周期性脉冲光。X射线球管产生能谱为1—10 keV的X射线,基本覆盖了X射线脉冲星辐射的能谱范围,斩波器将连续的X射线辐射调制为周期为1.5—300 ms脉冲辐射。

2.2. X射线光子计数探测器

图2为基于MCP的光子计数探测器示意图和

基于MCP的光子计数探测器实物图。基于MCP的X射线光子计数探测器由输入窗、光电阴极、MCP和位敏阳极组成。由于X射线脉冲星辐射能谱集中在1—10 keV的软X射线波段,常用的石英玻璃窗、铝窗对软X射线的透过率很低,为保证探测器的灵敏度满足探测要求,必须选择合适的输入窗材料。文献[4]报道了聚酰亚胺材料对1—10 keV的软X射线的透过率很高,且能有效地吸收1 keV以下的射线。目前选用了25 μm 的聚酰亚胺材料作为输入窗,其透过率如图3(a)所示^[5]。由图3(a)可以看出,25 μm 的聚酰亚胺对1—2 keV的X射线透过率不到0.3,而脉冲星的X射线辐射在1—2 keV范围最强。为提高1—2 keV能谱范围X射线的透过率,下一步考虑制作1 μm 左右的聚酰亚胺输入窗,其透过率如图3(b)所示^[5],在1—2 keV透过率为0.5—0.9之间。但是1 μm 的聚酰亚胺在200 eV附

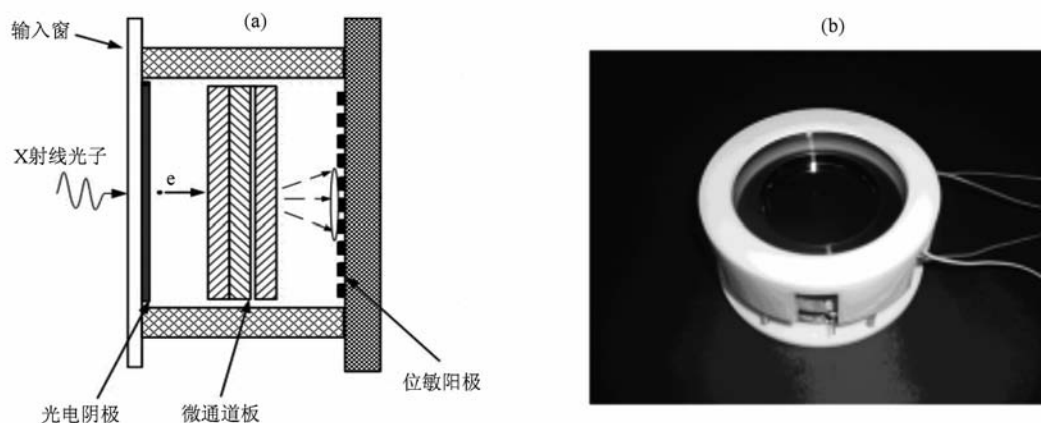
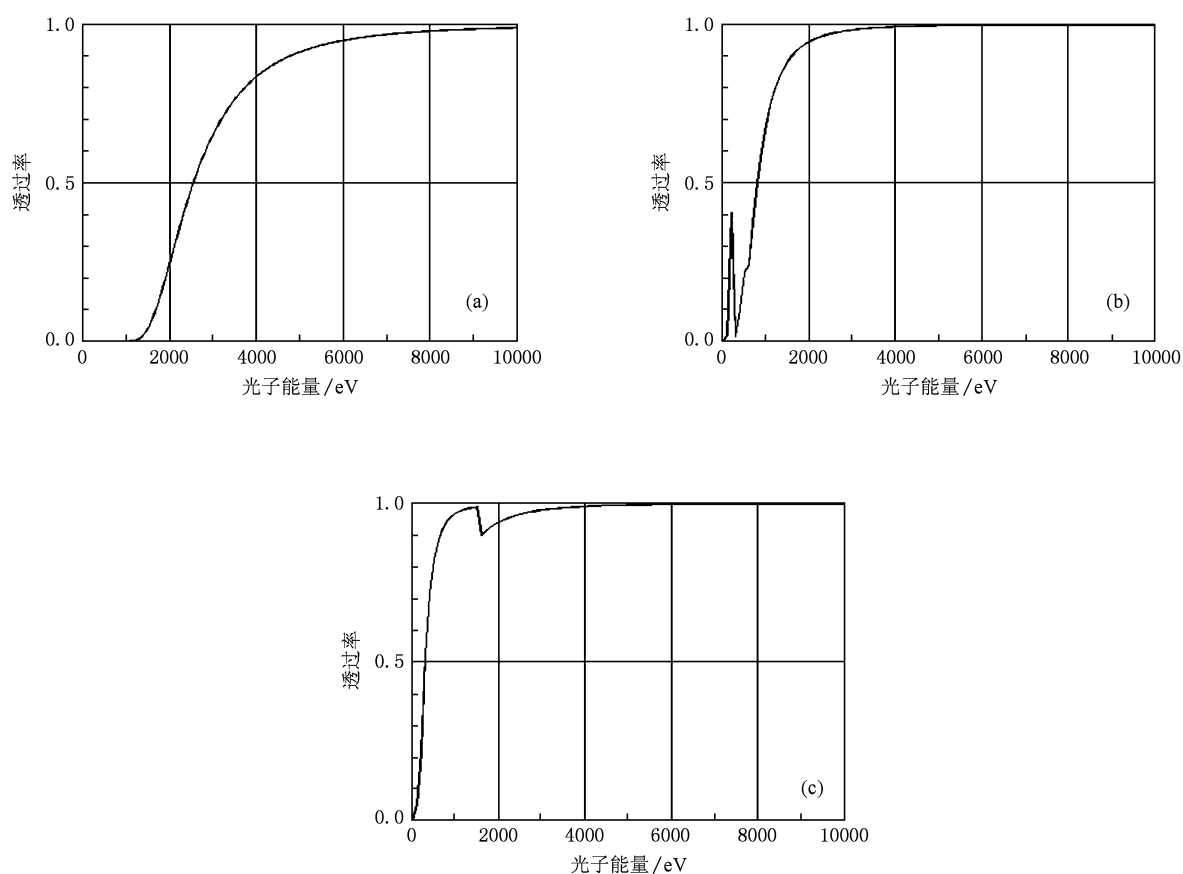


图2 基于 MCP 的光子计数探测器 (a)示意图, (b)实物图

图3 软 X 射线透过率曲线 (a) 25 μm 聚酰亚胺对软 X 射线透过率曲线, (b) 1 μm 聚酰亚胺对软 X 射线透过率曲线, (c) 50 nm Al 膜对软 X 射线透过率曲线

近透过率较大,接近 0.4. 为能有效屏蔽掉这部分射线,可在聚酰亚胺上蒸镀 50 nm 的 Al 膜,如图 3(c) 所示^[5],其透过率在 200 eV 处接近 0. X 射线脉冲星导航的关键技术之一就是获取高信噪比的 X 射线脉冲轮廓,以提高脉冲 TOA 的精度,这就要求探测

器系统提供高信噪比输出信号,对于基于 MCP 的 X 射线光子计数探测器,提高信噪比的关键技术之一就是高量子效率的光阴极研制. 采用 CsI 作为软 X 射线的光阴极,文献[6]对 CsI 光阴极与 Au 光阴极在软 X 射线波段的量子效率进行了比较,

在2—10 keV 波段, Au 光电阴极的量子效率在0.02—0.08 之间, 而平板 CsI 光电阴极的量子效率大于1, 在1—2 之间, 更利于提高信噪比, 因此采用CsI 作为软 X 射线光子计数探测器的光电阴极. MCP 是一种大面阵的高空间分辨的电子倍增探测器, 并具备非常高的时间分辨率. 三块“Z”型堆叠的MCP 可提供 10^6 — 10^7 的电子增益, 因此 MCP 适于极微弱的 X 射线脉冲星脉冲辐射的探测. 微通道板作为电子倍增系统, 其渡越时间约 1 ns, 渡越时间弥散约 15 ps, 响应时间非常短, 时间分辨率非常高, 满足 X 射线脉冲星导航光子计数探测器对时间响应和时间分辨率的要求. 位敏阳极作为 MCP 输出的二次倍增电子的接收电极, 可同时获取入射光子的二维位置信息和时间信息, 不仅可以测量 X 射线脉冲的 TOA, 还可以同时获取 X 射线脉冲源的影像信息.

2.3. 电子读出系统

电子读出系统由电荷灵敏前放与成形主放、峰值定时与保持电路和基于 FPGA (field programmable gate array) 的时间测量单元组成. 从阳极输出的信号是单个光电子脉冲, 脉冲前沿约为 4 μ s, 而后沿却很慢, 且幅值很小, 约十几个毫伏, 这种信号不适合后续处理, 需要通过电荷灵敏前放将电荷信号转化为

电压信号^[7]. 电荷灵敏放大器的基本原理如图4 所示, 其中 A 为集成运算放大器, C_f 是反馈电容, R_f 是反馈电阻, C 为耦合电容, R_D 是探测器偏置电阻. 假设从阳极输出的电荷量为 Q_D , 根据电路知识可知, 输出脉冲的幅值 V_{out} 为^[8]

$$V_{out} = \frac{Q_D A_0}{C_i + (1 + A_0) C_f} \approx \frac{Q_D}{C_f}. \quad (1)$$

经过电荷灵敏前放转换得到的电压信号, 其前沿仍然很陡, 且为消除电荷灵敏前放的脉冲堆积效应, 仍需要采用极零相消和成形放大电路, 对电荷灵敏前放输出信号做进一步处理, 使其为准高斯波形, 便于后续采样和处理. 如图5 所示为位敏阳极输出的原始信号和经过电荷灵敏前放及成形主放处理后的信号波形图.

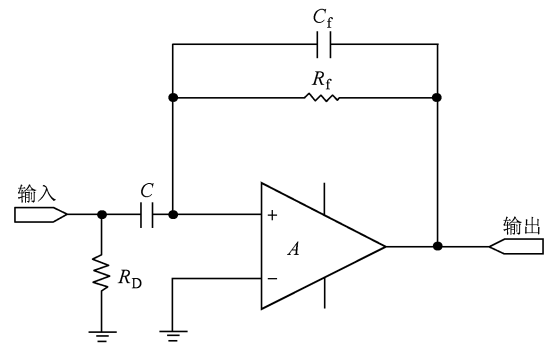


图4 电荷灵敏前放原理图

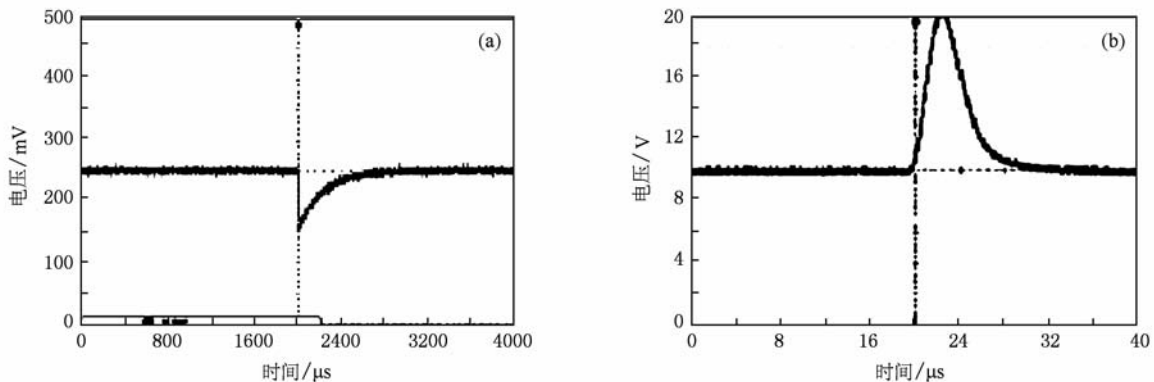


图5 原始信号及经前放和成形主放处理后的波形图 (a) 阳极输出原始信号波形图, (b) 经前放和成形主放处理后的波形图

图6 为峰值定时与保持电路的原理框图. 高速比较器1 作为鉴别器, 用以去除低于阈值的噪声信号. 高速比较器2, 采样保持芯片和单稳态芯片完成峰值定时和保持功能, 在输入信号未到达峰值前, 采样保持芯片的输出与输入信号仅仅存在一个时间延迟, 其输出被馈入高速比较器2 与输入信号作

比较, 其功能与恒比定时器一致, 只是这里的比例为1, 定时点对应于输入信号的峰值而已. 当输入信号到达峰值时, 高速比较器2 输出的定时信号经单稳态芯片整形为一宽度为4 μ s 的脉冲信号, 供后续的时间测量单元使用, 同时单稳态芯片输出的控制信号1 使采样保持芯片的输出保持峰值, 控制信号

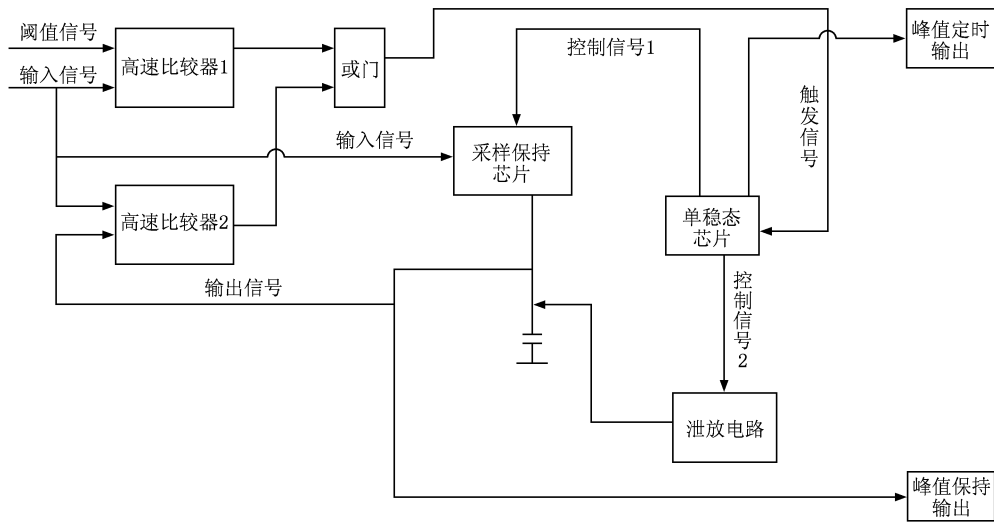


图6 峰值定时与保持电路原理框图

2 通过泄放电路来控制保持时间,供后续的位置解码单元使用.图7为峰值定时与保持电路的输出信号波形图.图7(a)为输入信号,图7(b)为峰值保持信号,在输入信号未到达峰值时与输入信号一致,输入信号到达峰值时,将峰值保持 $4\ \mu\text{s}$.图7(c)为峰值定时信号,在输入信号的峰值时刻输出宽度为 $4\ \mu\text{s}$ 的脉冲信号,其上升沿与输入信号的峰值时刻一致.基于FPGA的时间测量单元记录每个峰值定时信号相对采集起点的时间,采集结束后转化为X射线光子的绝对TOA.

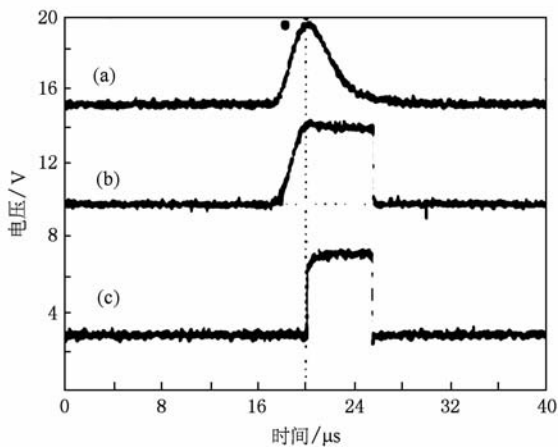


图7 峰值定时与保持电路的输出信号波形图 (a)输入信号, (b)峰值保持信号, (c)峰值定时信号

2.4. 数据处理

数据处理单元主要完成X射线脉冲轮廓的构

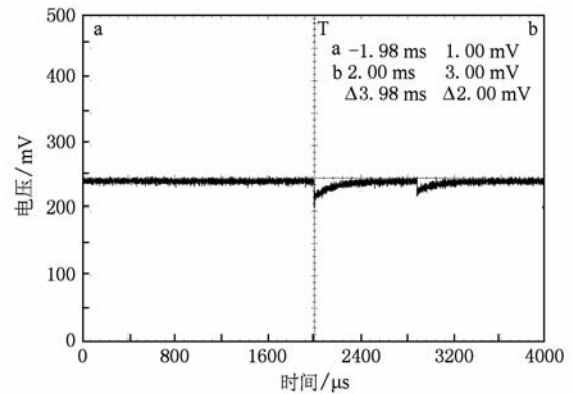


图8 单光子辐射原始波形图

造及脉冲TOA的计算.由于X射线脉冲星的X射线脉冲辐射非常微弱,短时间内无法获取X射线脉冲轮廓,为了得到X射线脉冲轮廓,必须进行长时间的采集.将足够长时间采集得到的X射线光子TOA数据按照脉冲周期分成 M 份,每一周期又均分成 N 份,每一份称为一个Bin,一个Bin实际对应一个特定的相位,每个Bin内可能有光子,也可能没有光子,最后把 M 个周期中所有的Bin按照等相位原则叠加到一个周期中,统计叠加后每个Bin中的光子数,就得到了X射线脉冲轮廓^[9].当然对实际的X射线脉冲星,在构造脉冲轮廓时还需要考虑达到时间转换^[10]及脉冲周期随时间演化的影响^[11].把测量得到的X射线脉冲轮廓与已知的X射线脉冲轮廓预测模型相比较就可计算出X射线脉冲TOA^[12,13].

3. 结果和讨论

实验中,将 X 射线脉冲源调制周期为 150 ms,主峰与次峰间隔为 1/4 周期,X 射线源强度通过改变 X 射线发生器的控制电压、电流及 X 射线源至探测器的距离来改变,通过示波器观察光电脉冲信号,将其调至单光子脉冲状态,如图 8 所示. 单光子脉冲信号经过电子读出系统记录每个单光子电脉冲信号 TOA,最后通过 X 射线脉冲轮廓的构造原理重现 X 射线脉冲轮廓. 实验分析了影响累积脉冲轮廓信噪比的三个因素.

3.1. 累积时间

图 9 为不同累积时间获取的累积脉冲轮廓图,读出系统的采样间隔为 0.2 ms, Bin 的大小为 1 ms. 可以看出随着累积时间的增长,累积脉冲轮廓的波形趋于光滑,主次峰强度逐渐可以区分,噪声的影响逐渐削弱,信噪比逐渐提高. X 射

线脉冲信号非常微弱,呈现单光子状态,单个光子的到达时间是随机事件,由于 X 射线脉冲信号具有周期性,大量的光子到达时间的统计分布是确定的,即特定相位占有光子的概率是确定的,但是噪声光子的到达时间不满足这样的统计规律,因此只要经过足够长时间的积分,信号得以加强,噪声相对得以抑制,就能获取高信噪比累积脉冲轮廓. 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,如下所示^[14]:

$$\sigma_r = c\sigma_{\text{TOA}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{TOA}} = \frac{W}{2r_{\text{SNR}}}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r_{\text{SNR}} &= \frac{F_x A p_f t_{\text{obs}}}{\sqrt{[B_x + F_x(1 - p_f)](At_{\text{obs}}d) + F_x A p_f t_{\text{obs}}}} \\ &= \frac{N_{\text{pul}}}{\sqrt{N_B + N_{\text{non-pul}} + N_{\text{pul}}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

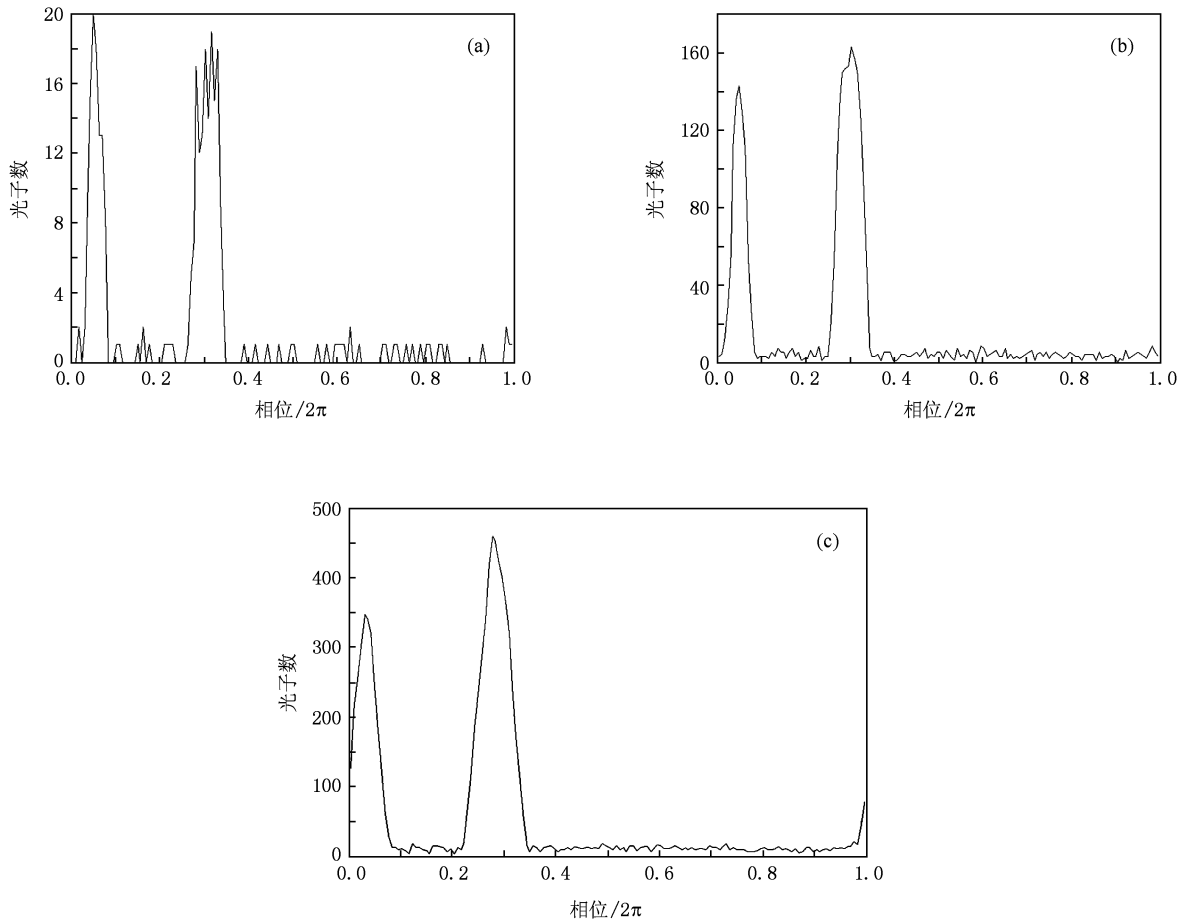


图9 不同积分时间的累积脉冲轮廓图 (a) 累积时间 15 s, (b) 累积时间 150 s, (c) 累积时间 450 s

其中 F_x 为 X 射线光子流量, A 为探测器面积, P_f 为脉冲信号辐射相对脉冲星总辐射的比值, B_x 为 X 射线背景辐射流量, t_{obs} 为观测时间长度, d 为占空周期, 可以表示为脉冲宽度 W 与脉冲周期 P 之比, 即 $d = W/P$, N_{pul} 为脉冲星辐射脉冲部分光子数, $N_{\text{non-pul}}$ 为占空周期 d 内脉冲星辐射非脉冲部分的光子数, N_B 为占空周期 d 内背景辐射的光子数. 由 (2), (3) 式可知导航定位测距误差反比于累积脉冲轮廓的信噪比, 而由 (4) 式可知累积脉冲轮廓的信噪比与累积时间成正比, 为满足特定的导航精度必须有足够长的累积时间, 但是累积时间也不能过长, 累积时间过长会影响导航的实时性, 因此累积时间的选取必须在精度和实时性间折中考虑.

3.2. Bin 的大小

图 10 为不同 Bin 大小的累积脉冲轮廓图, 采样间隔均为 0.2 ms, 累积时间均为 450 s. 三图相比较, 图 10(a) 中脉冲轮廓波形毛刺现象严重, 波形曲线不光滑, 信噪比低; 图 10(c) 虽然波形相对比较光滑, 但是却丢失了脉冲轮廓的部分细节信息; 图 10(b) 累积脉冲轮廓的效果较好. 由此可见, 在构造 X 射线脉冲轮廓时, Bin 存在一个最佳值, 如果 Bin 太小, 一个 Bin 内信号光子的数目相对减小, 噪声光子的影响相对增强, 信噪比下降, 如果 Bin 太大, 获得的数据点就会减少, 脉冲轮廓的细节就会丢失.

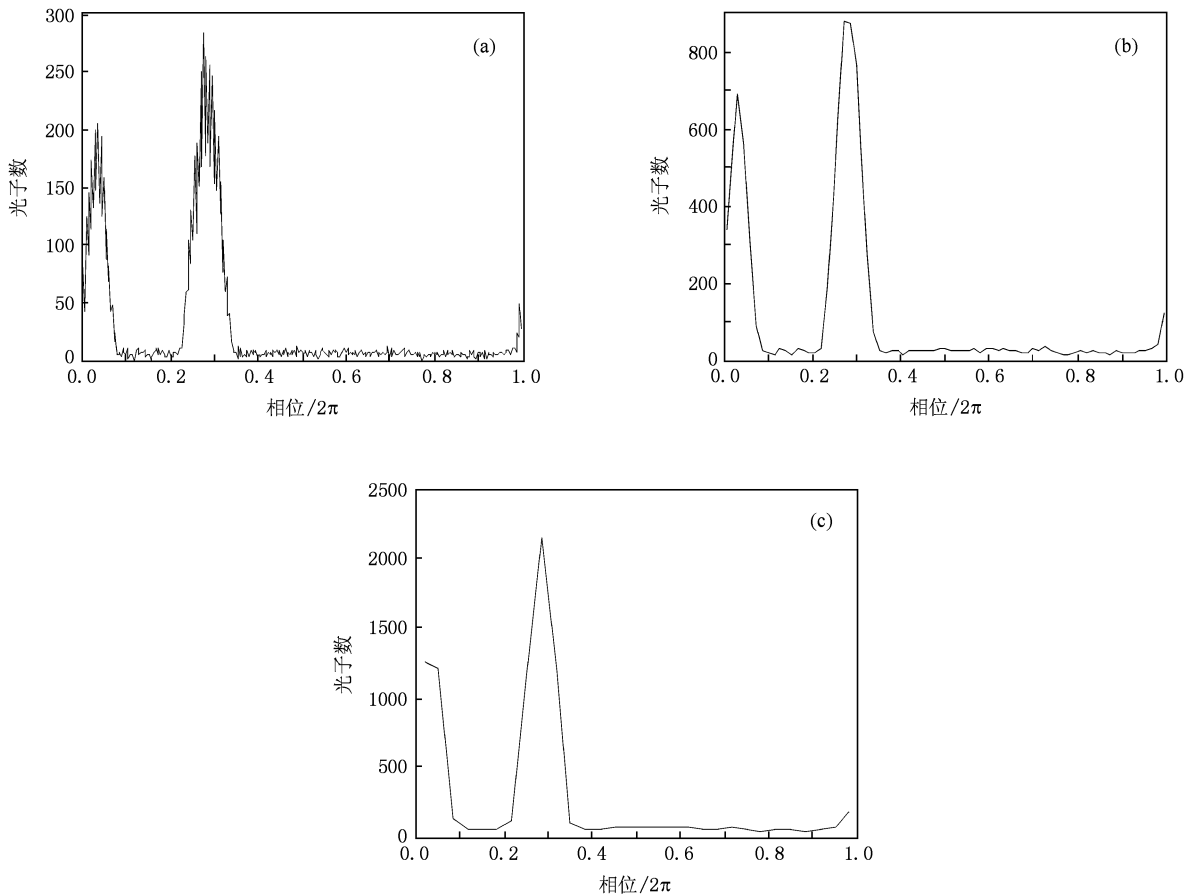


图 10 不同 Bin 大小时的累积脉冲轮廓图 (a) Bin 大小为 0.5 ms, (b) Bin 大小为 2 ms, (c) Bin 大小为 5 ms

3.3. 采样间隔

图 11 为将电子读出系统的时间分辨设置为不同值时获取的累积脉冲轮廓图, 积分时间均为 450 s. 可以看到随着读出系统时间间隔的增大, 累积脉冲轮廓的信噪比下降, 主峰高度依次为 450,

180, 98, 次峰高度依次为 350, 120, 68. 电子读出系统时间间隔增大, 就会丢失部分光子信息, 使整个探测系统的探测效率降低, 进而降低累积脉冲轮廓的信噪比. 因此, X 射线脉冲光子计数探测系统必须具有足够高的时间分辨能力, 以提高系统的探测效率.

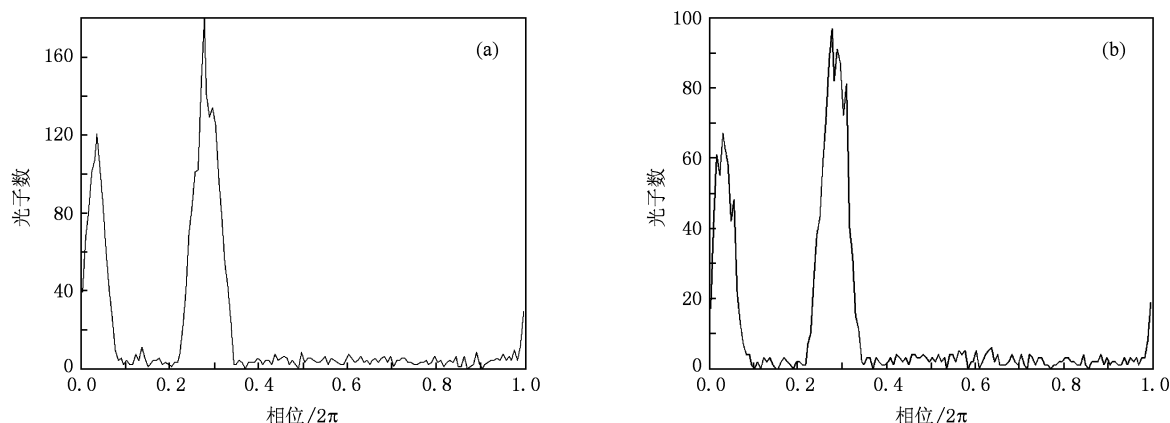


图 11 不同采样间隔时的累积脉冲轮廓图 (a) 采样间隔为 0.6 ms, (b) 采样间隔为 1 ms

4. 结 论

搭建了基于 X 射线脉冲星导航的地面模拟系统, 实现了 X 射线脉冲星辐射源的模拟, X 射线单光子计数探测, 完成了 X 射线脉冲轮廓的构造, 依据 TOA 算法可实现 X 射线脉冲到达时间的测量. 分析了影响累积脉冲轮廓信噪比的三个因素: 累积时间、Bin 的大小及采样间隔. 为满足特定导航精度要求, 必须选择合适的累积时间及 Bin 的大小, 减小采

样间隔以提高系统对单光子事件探测效率. 该系统对于开展 X 射线脉冲星导航核心技术攻关和相关理论研究具有重要意义. 下一步将对 X 射线探测器的灵敏度进行标定, 降低探测系统的噪声, 提高探测器的灵敏度, 改进电子读出系统方案, 提高时间分辨率.

感谢中国科学院国家授时中心的陈鼎、杨廷高、蔡红兵, 中国科学院西安光学精密机械研究所光电子学研究室赛小锋、韦永林、刘永安、陈宝梅等同志的大力支持与指导.

- [1] Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C, Davis M M, Goss W M 1982 *Nature* **300** 615
- [2] Sheikh S I, Pines D J, Ray P S, Wood K S, Lovellette M N, Wolff M T 2004 *Proceedings of 14th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Conference* Maui, HI, February 8—12, 2004 p105
- [3] NASA http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/how_11/xray_detectors.html
- [4] Grande M, Maddison B J, Howe C J, Kellett B J 2009 *Planetary and Space Science* **57** 717
- [5] Henke http://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html
- [6] Rideout R M, Pearson J F, Fraser G W, Lees J E, Brunton A N, Bannister N P, Kenter A T, Kraft R P 1998 *Proc. SPIE* **3445** 384
- [7] Zhang X H, Zhao B S, Liu Y A, Miao Z H, Zhu X P, Zhao F F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1779 (in Chinese) [张兴华、赵宝升、刘永安、缪震华、朱香平、赵菲菲 2009 物理学报 **58** 1779]
- [8] Zhang X H, Zhao B S, Miao Z H, Zhu X P, Liu Y A, Zou W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4238 (in Chinese) [张兴华、赵宝升、缪震华、朱香平、刘永安、邹 玮 2008 物理学报 **57** 4238]
- [9] Yang Y G 2008 *Chin. J. Space Sci.* **28** 330 (in Chinese) [杨廷高 2008 空间科学学报 **28** 330]
- [10] Xiong K, Wei C L, Liu L D 2009 *Acta Astronautica* **64** 427
- [11] Kouveliotou C, Dieters S, Strohmayer T, van Paradijs J, Fishman G J, Meegan C A, Hurley K, Kommers J, Smith I, Frail D, Murakami T 1998 *Nature* **393** 235
- [12] Taylor J H 1991 *Proc. IEEE* **79** 1054
- [13] 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]
- [14] Sheikh S I, Pines D J 2006 *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **29** 49

A simulation experiment system for X-ray pulsar based navigation

Hu Hui-Jun^{1) 2)†} Zhao Bao-Sheng¹⁾ Sheng Li-Zhi^{1) 2)} Yan Qiu-Rong^{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) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 29 June 2010; revised manuscript received 15 July 2010)

Abstract

A simulation experiment system for X-ray pulsar based navigation is setup in order to study the key technologies of X-ray pulsar navigation. The system consists of X-ray pulsar source generator, super sensitive X-ray photon counting detector, charge sensitive amplifier, shaping amplifier, time measurement, X-ray pulse profile reconstruction and pulse time of arrival (TOA) measurement. The system can simulate the X-ray pulsar source with different intensities, period and pulse profile. The TOA of individual X-ray photon is recorded, the pulse profile is reconstructed with these data. And by comparing the measured pulse profile with the standard pulse profile of the X-ray pulsar source generator, the pulse TOA is calculated. The construction and the principle of the simulation experiment system are introduced and experiment results are presented.

Keywords: pulsar navigation, micro-channel plate photon counting detector, pulsar profile

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

† E-mail: huhuijun@opt.ac.cn