

基于 X 射线脉冲星导航的模拟调制仿真源研究*

周峰¹⁾²⁾ 吴光敏¹⁾ 赵宝升²⁾ 盛立志²⁾³⁾ 宋娟²⁾³⁾ 刘永安²⁾
鄢秋荣²⁾ 邓宁勤²⁾³⁾ 赵建军^{1)†}

1) (昆明理工大学理学院, 昆明 650093)

2) (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)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2012 年 12 月 17 日收到; 2013 年 1 月 21 日收到修改稿)

为实现 X 射线脉冲星导航系统在地面的演示验证, 提出并设计了一种高精度 X 射线脉冲星仿真源. 该仿真源由模拟调制信号发生器和栅控 X 射线球管组成. 模拟调制信号发生器根据脉冲星标准脉冲轮廓数据和栅控球管特性曲线, 利用直接数字频率合成技术产生模拟调制信号, 加载在 X 射线球管控制栅极, 从而控制轰击阳极靶的高速电子数目来实现 X 射线的调制, 产生与脉冲星标准脉冲轮廓高吻合度的 X 射线光子统计分布. 在 X 射线脉冲星地面仿真系统中对 Crab 脉冲星仿真源的性能进行测试, 测试结果为: 采集脉冲轮廓与标准脉冲轮廓时域相关度和频率相关度分别达到 0.9774 和 0.9853, 辐射流量为 $1.90 \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 脉冲辐射流量与总辐射流量之比为 76.15%, 脉冲半宽度为 1.879 ms. 结果表明: 该仿真源具有符合度高, 成本低, 操作简单灵活, 对 X 射线脉冲星导航关键技术的攻关具有重要的意义.

关键词: X 射线脉冲星导航, 仿真源, 栅控 X 射线球管, 直接数字频率合成

PACS: 97.60.Gb, 07.85.Fv, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.62.119701

1 引言

1967 年, Bell 等发现了第一颗脉冲星^[1]. 因脉冲星具有非常稳定的自转周期等特质受到多个领域科学家的青睐. 1981 年, Chester 和 Butman 提出了利用 X 射线脉冲星为航天器导航的构想. 2003 年 Sheikh 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^[2], 引起国际空间导航界的广泛关注. 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 (XNAV)”研究计划, 掀起了 XNAV 研究的热潮. 由于 X 射线难以穿透大气层, 因此在地面探测 X 射线脉冲星信号极其困难. 同时, 空间搭载实验又需要巨大的经费支持. 在 XNAV 空间搭载实验之前, 为了评估研究方案的可行性, 标定 X 射线探测器、验证导航算法、定量考核各子系统性能

指标、系统联调及测试导航系统的性能, 必须搭建 XNAV 地面仿真系统^[3-5], 该系统的关键技术之一就是 X 射线脉冲星仿真源.

目前, XNAV 地面仿真系统绝大多数采用电机驱动斩波器的外调制来实现 X 射线脉冲星信号的仿真^[5,6]. 该波形调制器通过在斩波器上设计特殊的波形调制孔来仿真脉冲星轮廓和 X 射线背景噪声, 通过设置电机的转速实现脉冲星周期的仿真. 但由于该方法仿真脉冲轮廓细节能力差, 仿真不同脉冲轮廓的灵活性弱, 机械调制精度低, 波形调制器置于真空环境的难度大、费用高等缺陷, 一直未被广泛应用.

为了解决上述问题, 本文在文献 [7] 的基础上设计了一种模拟调制方式的栅控 X 射线脉冲星仿真源, 介绍了该仿真源的组成和工作原理, 实验测试了其性能指标, 结果表明栅控模拟调制仿真源具有很好的脉冲轮廓吻合度.

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

† 通讯作者. E-mail: 598965297@qq.com

2 仿真源组成和工作原理

图 1、图 2 分别为栅控 X 射线脉冲星仿真源的原理图和实物图. 该仿真源主要包括栅控 X 射线球管和模拟调制信号发生器两个部分.

如图 1 所示, 栅控 X 射线球管是在普通 X 射线球管的热阴极 (灯丝) 与阳极靶之间增加栅极改进而来. 调节加载在栅控 X 射线球管栅极上的电压 V_G , 就可以改变 X 射线球管内的电场, 使热阴极发射的电子在球管内的运行轨迹发生变化, 从而控制轰击阳极靶的高速电子的数目, 实现对出射 X 射线的调制. 阳极高压 V_a 与阳极靶材决定出射 X 射线的能谱.

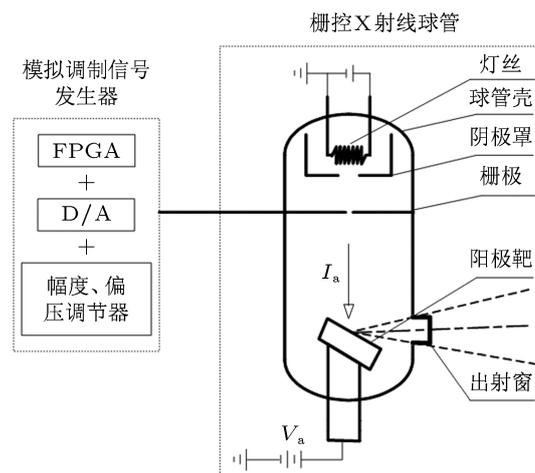


图 1 栅控 X 射线脉冲星仿真源原理图

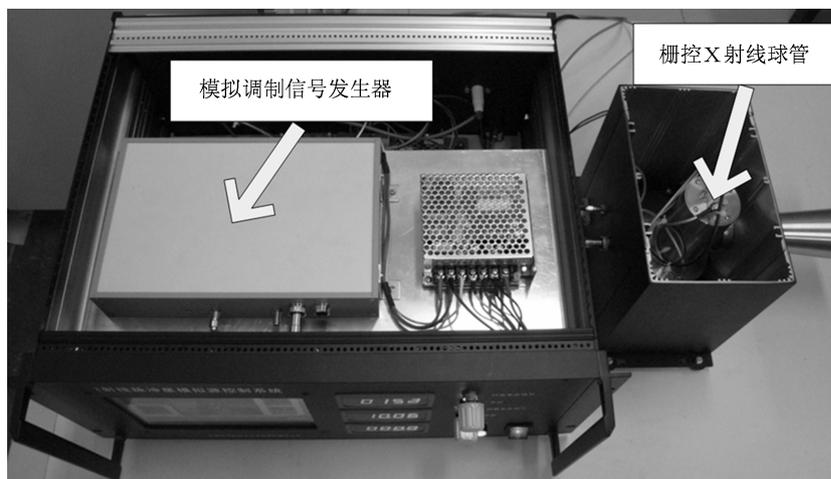


图 2 栅控 X 射线脉冲星仿真源实物图

图 3 为栅控 X 射线球管的特性曲线, 由图可知, V_G 与出射 X 射线流量成非线性关系, 通过数值拟合得到该曲线的数学表达式. 利用该数学表达式把 X 射线脉冲轮廓转换为 V_G 波形数据. 模拟调制信号发生器将获取的 V_G 波形数据采用直接数字频率合成技术, 经 FPGA(Field Programmable Gate Array) 与 D/A 转换器合成 V_G 波形, 并把该波形加载在栅控 X 射线球管的栅极, 实现 X 射线脉冲星源的仿真.

针对不同的脉冲星源, 只需更换 X 射线脉冲轮廓的数据, 便能使用该装置实现对应 X 射线脉冲星源轮廓的仿真. 同时, 根据不同脉冲星的辐射流量及不同栅控 X 射线球管的栅控特性, 通过幅度、偏压调节器改变 V_G 波形的幅度和偏置电压, 又可简单灵活地控制 X 射线流量并仿真空间 X 射线背景.

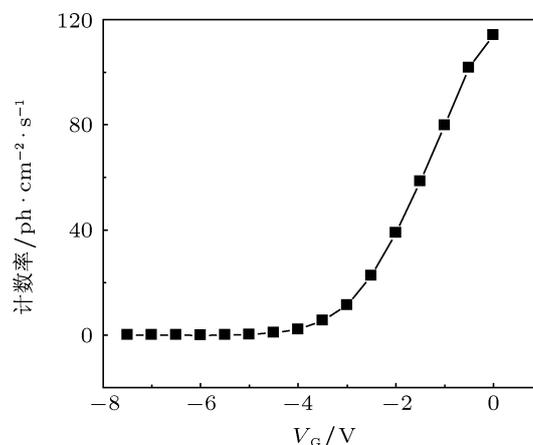


图 3 灯丝电流 1.5 A, 阳极高压 12 kV 时, 栅控 X 射线球管特性曲线

图 4 为实验系统示意图 [5]. 仿真源辐射的调制

X 射线入射到具有单光子探测能力的 MCP (Micro-Channel Plate) 光子计数探测器^[8], 将探测器阳极收集到的电子通过电子读出系统^[9,10] 和时间测量单元高精度记录代表单光子事件发生的时刻. 经过足够长时间的采集 (采集时间主要取决于源的辐射特

性, 在本实验系统中, 以 Crab 脉冲星为例, 采集时间为 600 s), 获得大量的 X 射线光子到达探测器的时间数据, 采用自行设计的软件将这些时间数据按脉冲星周期进行历元叠加^[11], 得到高信噪比的累积脉冲轮廓.

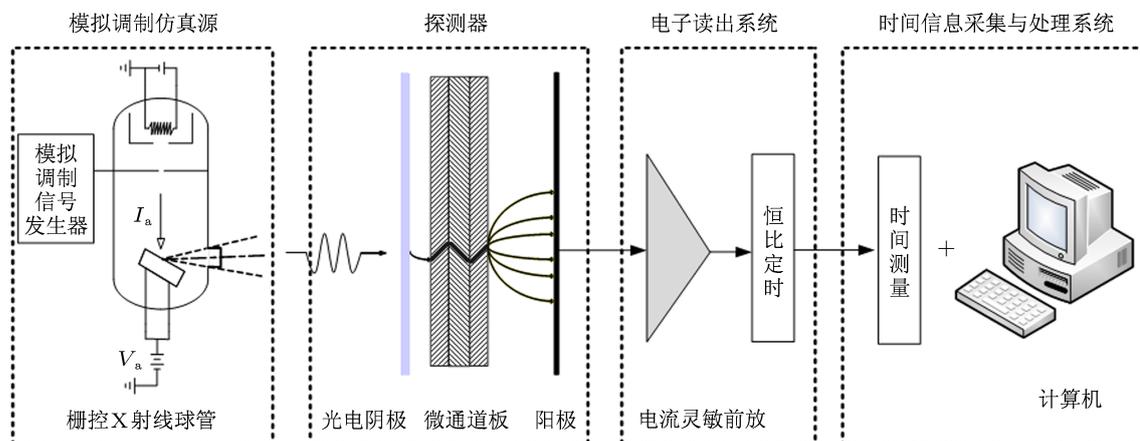


图 4 X 射线脉冲星仿真源实验系统示意图

3 实验结果与分析

在 X 射线脉冲星导航系统中, 脉冲到达时间的测量精度 σ_{TOA} 决定 X 射线脉冲星导航精度 σ_r , 而脉冲到达时间的测量精度 σ_{TOA} 又取决于累积脉冲轮廓的信噪比 r_{SNR} , 具体关系如下所示^[12]:

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

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

$$r_{SNR} = \frac{F_x A p_f t_{obs}}{\sqrt{[B_x + F_x(1 - p_f)] A t_{obs} d + F_x A p_f t_{obs}}}, \quad (3)$$

其中, F_x 为 X 射线光子总流量, 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, t_{obs} 为探测器的观测时间, B_x 为空间 X 射线背景辐射流量, W 为脉冲轮廓峰值半宽度, d 为 W 与周期的比值. 由 (1)—(3) 式可知, X 射线脉冲星辐射的脉冲轮廓特性直接影响着 X 射线脉冲星导航精度 σ_r . 因此, 仿真源的脉冲轮廓特性必须尽可能与真实脉冲星的脉冲轮廓特性相一致, 评价两者一致性的性能指标主要有脉冲轮廓时域相关度, 频域相关度, F_x , p_f , W .

3.1 仿真源性能测试

实验中, 为了减少空气对软 X 射线的阻挡, 使

栅控 X 射线球管出射窗距探测器的入射窗尽可能近 (10 cm). 给灯丝提供 1.5 A 的恒流, 当灯丝发射的热电子流稳定时, 在阳极靶上加 12 kV 的高压. 利用模拟调制信号发生器给栅控 X 射线球管栅极加载 V_G 波形, V_G 波形如图 5(a) 所示, 其电压幅度选择线性度较好的 -3 V—-0.5 V 范围内. 实验采集 600s 得到的累积脉冲轮廓如图 5(b) 所示.

将采集得到的累积脉冲轮廓数据与 X 射线脉冲星数据库中脉冲轮廓进行比对, 如图 6(a) 所示, 其时域相关度为 0.9960. 对累积轮廓与标准轮廓分别进行快速傅里叶变换^[13], 得到轮廓的频谱对比图, 如图 6(b) 所示, 其频域相关度为 0.9973. 经计算, F_x 为 $11.62 \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, p_f 为 57.32%, W 为 1.253 ms. 在备选导航用 X 射线脉冲星源数据库中显示 Crab 脉冲星的数据参数^[14] F_x 为 $1.54 \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, p_f 为 70%, W 为 1.670 ms. 从这些数据可以看出, 与数据库中的参数相比, 脉冲轮廓的时域相关度和频域相关度都高达 0.99, p_f 偏小 12.88%, W 偏小 25%, 但是 F_x 高出 6 倍. 而能探测到的 X 射线脉冲星流量极弱, 因此必须考虑 X 射线辐射流量的控制问题.

3.2 流量抑制

根据栅控球管的特性曲线可知, 减小 X 射线流

量可以采用降低栅极电压的方法. 当 X 射线流量很低时, 特性曲线的非线性度很大. 为了更加准确的模拟 X 射线脉冲轮廓, 实验首先选取栅极电压幅度为 -4 V — -2 V 的流量值, 数值拟合该区域的特性关系表达式, 然后再转换标准脉冲轮廓数据并生成 V_G 波形. 实验时, 采集时间不变, 仍为 600 s . 图 7(a) 为采集脉冲轮廓与标准脉冲轮廓时域对比图, 其时域相关度为 0.9774 ; 图 7(b) 为采集累积轮廓与标准轮廓频域对比图, 其频域相关度为 0.9853 . 经计算, F_x 为 $1.90\text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, p_f 为 76.15% , W 为 1.879 ms . 与数据库中的参数相比, 脉冲轮廓的时域相关度和频域相关度都在 0.97 以上, 相对于栅极电压为 -3 V — -0.5 V 时的相关度略有降低; F_x 偏高 23% , p_f 偏大 6.15% , W 偏大 13% . 各性能指标都在栅极电压为 -3 V — -0.5 V 时的基础上有所改善. 因此, 在尽可能的保证脉冲轮廓的时域相关度和频域相关度的前提条件下, 选择合适的栅极电压幅度范围, 是抑制 X 射线流量的重要手段. 同时, p_f 和

W 的指标都在一定程度上有所改善.

3.3 累积时间

表 1 为 V_G 波形的幅度在 -4 V — -2 V 时, 针对同一采集实验, 从开始采集时刻截取不同时间长度的数据进行脉冲轮廓累积, 并得到五个评价仿真源的性能参数. 从表中可以看出, 累积时间小于 10 s 时, 采集脉冲轮廓的时域相关度和频域相关度低于 90% , 随着累积时间的增加, 脉冲轮廓相关度逐步提高, 累计时间越长相关度提高得越慢. F_x 和 p_f 随累积时间的增加而逐步减小, 并分别趋近于 $1.54\text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 70% . W 随累积时间的增加而逐步增大, 并趋近于 1.670 ms . 由上述实验数据可知, 脉冲轮廓的各性能参数都随累积时间的增加而得到改善. 实验结果与 X 射线脉冲星辐射的大量随机光子事件满足稳定的统计分布相符合, 进一步验证了该模拟调制仿真源的可行性及优越性.

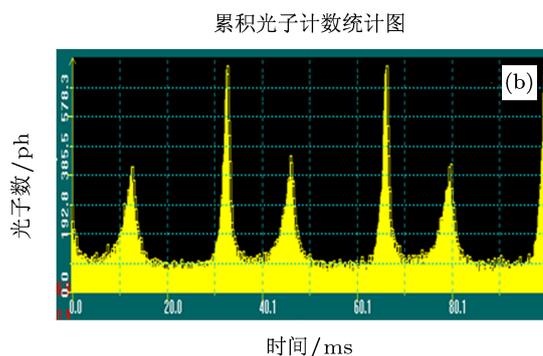
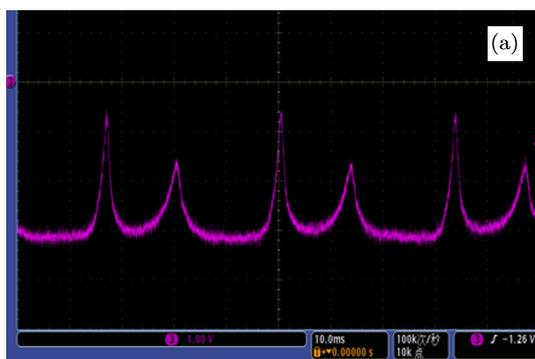


图 5 (a) 栅极加载的 V_G 波形; (b) 采集得到的累积脉冲轮廓

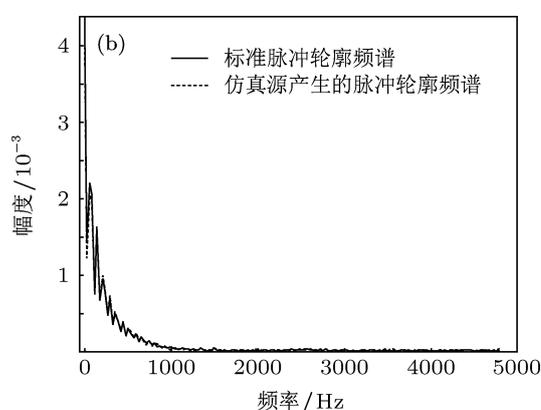
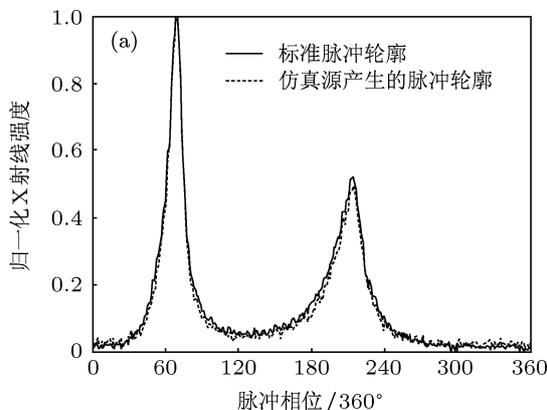


图 6 V_G 波形的幅度在 -3 V — -0.5 V 时, 去背景归一化 X 射线辐射强度的时域和频域对比 (a) 时域; (b) 频域

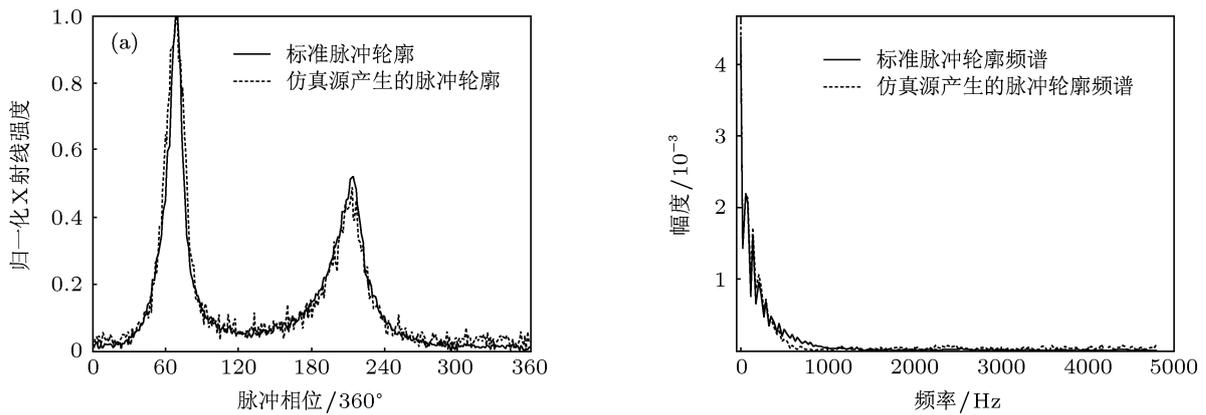


图7 V_G 波形的幅度在 -4 V — 2 V 时, 去背景归一化 X 射线辐射强度的时域比对和频域比对 (a) 时域; (b) 频域

表 1 不同累积时间脉冲轮廓的性能参数

累积时间/s	时域相关度	频域相关度	$F_x/\text{ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	P_t	W/ms
1	0.3803	0.4936	2.4570	100%	0.522
10	0.7949	0.8678	2.4190	100%	1.046
100	0.9470	0.9654	2.0508	92.20%	1.046
600	0.9774	0.9852	1.8974	7615%	1.877

4 结论

设计了一种简单准确灵活的 X 射线脉冲星仿真源, 实验验证了该模拟调制仿真源的可行性和优越性, 并利用 Crab 脉冲星轮廓数据对模拟调制源仿真源的性能指标进行了测试. 测试最好结果显示采集脉冲轮廓与标准脉冲轮廓时域相关度为 0.9774, 采集累积轮廓与标准轮廓频域相关度为 0.9853; 与数据库参数对比, 总辐射流量低 13%, 脉冲信号辐射相对脉冲星总辐射的比值偏大 6.15%、

脉冲半宽度偏大 13%. 通过降低栅极电压能很好的抑制仿真源辐射的 X 射线流量. 选取恰当的栅极电压幅度范围, 可以获得模拟调制仿真源的性能指标最优值. 此外, 还研究了累积时间对采集脉冲轮廓的影响, 实验结果与 X 射线脉冲星辐射的大量随机光子事件满足稳定的统计分布一致. 该模拟调制仿真源的建立, 对完善 X 射线脉冲星导航地面仿真系统提供了有力的支撑.

感谢中国科学院西安光学精密机械研究所光电子学室赛小锋、韦永林、刘哲等同志的大力支持与指导.

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, Scott P F, Collins R A 1968 *Nature* **217** 709
- [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] Su Z, Xu L P, Wang T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 119701 (in Chinese) [苏哲, 许录平, 王婷 2011 物理学报 **60** 119701]
- [4] Sheng L Z, Zhao B S, Sai X F, Hu H J, Chen D 2010 *Chinese Patent* 201010140837. 8 [2010-04-07]
- [5] 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, 鄂秋荣 2011 物理学报 **60** 029701]
- [6] Zheng W, Sun S M, Tang J G 2010 *1st China Satellite Navigation Conference* Beijing, China, May 18–22, 2010 (in Chinese) [郑伟, 孙守明, 汤国建 2010 第一届中国卫星导航学术年会北京, 2010 5. 18–22]
- [7] Sheng L Z, Zhao B S, Zhou F, Liu Y A, Yan Q R, Sai X F, Wei Y L 2012 *Chinese Patent* 201210087972. X [2012-03-29]
- [8] 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, 鄂秋荣, 陈宝梅, 王朋 2012 物理学报 **61** 019701]
- [9] Tanaka M, Ikeda H, Ikeda M, Inaba S 1992 *IEEE Trans Nuclear Science* **39** 1321
- [10] Wang P, Zhao B S, Sheng L Z, Hu H J, Yan Q R 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 209702 (in Chinese) [王朋, 赵宝升, 盛立志, 胡慧君, 鄂秋荣 2012 物理学报 **61** 209702]
- [11] Yang Y G 2008 *Chin. J. Space Sci.* **28** 330 (in Chinese) [杨廷高 2008 空间科学学报 **28** 330]
- [12] Sheikh S I, Pines D J 2006 *J. Guid. Contr. Dyn.* **29** 49
- [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 2005 *Ph. D. Dissertation* (Maryland USA: University of Maryland)

An analog modulated simulation source for X-ray pulsar-based navigation*

Zhou Feng¹⁾²⁾ Wu Guang-Min¹⁾ Zhao Bao-Sheng²⁾ Sheng Li-Zhi²⁾³⁾
Song Juan²⁾³⁾ Liu Yong-An²⁾ Yan Qiu-Rong²⁾
Deng Ning-Qin²⁾³⁾ Zhao Jian-Jun^{1)†}

1) (Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

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

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

(Received 17 December 2012; revised manuscript received 21 January 2013)

Abstract

In this paper a high resolution X-ray simulation source is proposed and designed to verify the navigation based on X-ray pulsar in the simulation experience system. The simulation source consists of an arbitrary signal generator and a grid controlled X-ray tube. According to the grid tube's characteristic curve, the data of the pulsar standard pulse template are converted. Then using the method of direct digital frequency synthesis, the converted data are synthesized to waveforms, called the analog modulated grid voltage. In the grid controlled X-ray tube, the grid voltage changes the number of electrons hitting on the target and controls the X-ray intensity. With an analog modulated pulse profile applied on the tube grid electrode, the tube will emit X-rays which will match photons' statistical distribution and simulate the X-ray pulsar profile extremely well. The properties of Crab pulsar simulation source are tested in X-ray pulsar navigation simulation experience system. The results of the test are as follows: Comparing the tested pulse profile with the standard pulsar profile, we have time correlation coefficient is 0.9774, and frequency correlation coefficient is 0.9853. The X-ray photon flux is $1.90 \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, the pulsed fraction is 76.15%, and the half-width half maximum is 1.879 ms. These results show that the X-ray simulation source has several merits, such as: strong ability to simulate the X-ray, low cost and simple operation. So it is an important means for the improvement of X-ray pulsar navigation.

Keywords: X-ray pulsar navigation, simulated source, grid controlled X-ray tube, direct digital frequency synthesis (DDS)

PACS: 97.60.Gb, 07.85.Fv, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.62.119701

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

† Corresponding author. E-mail: 598965297@qq.com