

基于 X 射线脉冲星的导航半实物仿真系统*

刘利, 郑伟, 汤国建, 孙守明

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为验证 X 射线脉冲星导航的关键技术, 本文描述了基于 X 射线脉冲星导航的半实物仿真系统组成和工作原理, 并搭建了基于 X 射线脉冲星导航的半实物仿真系统。系统由信号模拟单元、信号接收单元和导航估计单元组成, 此系统可有效模拟 X 射线脉冲星导航的星源强度、周期及脉冲轮廓, 记录 X 射线脉冲星单光子到达时间, 恢复 X 射线脉冲星脉冲轮廓, 计算 X 射线脉冲到达时间及导航估计解算。所设计的半实物仿真系统为 X 射线脉冲星导航算法测试提供了有效手段, 对 X 射线脉冲星自主导航研究的可行性验证、动态性能测试以及工程应用具有一定的参考价值。

关键词: X 射线脉冲星; 导航系统; 半实物仿真

中图分类号: TP316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)05-0010-05

The hardware-in-loop simulation system of X-ray-pulsars-based navigation

LIU Li, ZHENG Wei, TANG Guojian, SUN Shouming

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A hardware-in-the-loop simulation system for X-ray pulsar navigation was built in order to do some research for the key technologies in X-ray pulsar navigation field. The system consists of an X-ray pulsar source simulation unit, an X-ray photon receive unit and a navigation estimate unit. The system can simulate X-ray pulsar with different intensities, periods and pulse profiles. The TOA of individual X-ray photon was recorded, and the pulse profile was reconstructed with these data. By comparing the measured pulse profile with the standard pulse profile of the X-ray pulsar source generator, the pulse TOA and the navigation estimation were calculated in the DSP chip. This system is proved effective in test some pulsar navigation algorithms, and can provide reference for the test of feasibility, dynamics and the project application for related X-ray pulsar navigation.

Key words: X-ray pulsars; navigation system; hardware-in-the-loop simulation

基于 X 射线脉冲星的自主导航是一种新概念导航方法。X 射线脉冲星作为自然的天体, 其运行特性不会受到人为的破坏与干扰, 其可见性不受近地空间范围的限制。该方法最早提出于 20 世纪 70 年代, 在 30 多年的时间里, Chester^[1], Hanson^[2], Sheikh^[3], Emadzadeh^[4] 等做了大量的工作, 在 20 世纪末到本世纪初, 逐渐形成一套完整的导航方案, 并已进入试验阶段。

由于地球大气层对 X 射线的吸收, 在地面无法观测到脉冲星的 X 射线辐射。再者, 由于飞行实验费用大, 系统的器件调试, 算法的实验测试, 以及导航系统的性能验证, 在研制初期不可能通过实时飞行测试完成。地面半实物仿真是研究及验证航天器导航方法的最佳手段, 它相对于飞行实验来说, 研制周期短、成本费用低; 相对于数字仿真来说, 可验证算法的实时性、完成器件的调

试。因此, 研究 X 射线脉冲星导航半实物仿真技术具有重要理论和实践意义。

1 X 射线脉冲星导航原理

基于 X 射线脉冲星的自主导航基本原理是在太阳质心惯性系中比较预报的脉冲到达太阳系质心 (Solar System Barycenter, SSB) 的时间和航天器上测量到的脉冲经时间转换模型外推到达 SSB 的时间。探测器实际测量到的脉冲到达时间经时间转换模型外推后与预报时间之差 δt 反映了预估位置 \tilde{r} 和真实位置 r 的偏差 dr , 如图 1 所示。在探测器到脉冲星的方向上, $c\delta t = n \cdot \delta r$ (c 为光速), 利用多个不同脉冲星的测量结果就可以解得三维位置偏差, 从而对预估的位置进行补偿^[5]。

* 收稿日期: 2012-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10973048)

作者简介: 刘利 (1985—), 男, 湖南常德人, 博士研究生, E-mail: hg_liuli@163.com;

郑伟 (通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: zhengwei@nudt.edu.cn

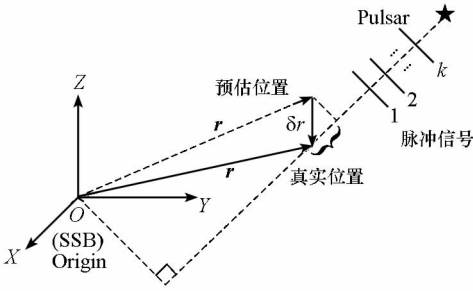


图1 X射线脉冲星导航基本原理

Fig. 1 The principle of the navigation based on X-ray pulsars

2 半实物仿真系统方案设计与实现

X射线脉冲星导航地面半实物仿真系统的总体方案如图2所示。所设计的X射线脉冲星导航半实物仿真系统主要由信号模拟单元、信号接收单元、导航估计单元以及三台计算机组成。

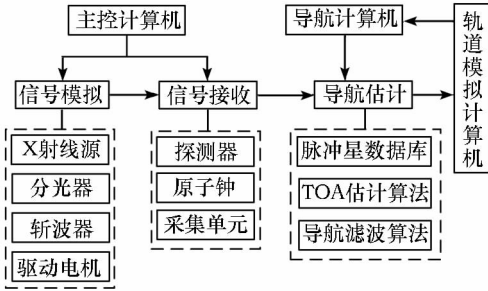


图2 X射线脉冲星导航半实物仿真系统总体方案

Fig. 2 The scheme of hardware-in-loop simulation system for the X-ray-pulsars-based navigation

2.1 信号模拟单元

X射线源的核心部件为阴极灯丝和阳极靶。X射线管内的阴极钨灯丝被加热后发出大量的热电子,电子经高压加速后撞击阳极金属靶,从而使热电子的少部分能量以X射线的形式向外辐射。

为同时模拟多颗脉冲星,利用光子的衍射原理,使单条光路衍射分成多条光路,分光材料的晶体间距与主光路相对于分光器的入射角度,应满足布拉格公式。

$$2d_{hkl} \sin\theta = \lambda \quad (1)$$

其中, d_{hkl} 为分光器材料的衍射面间距, λ 为入射X射线波长, θ 为光子发生衍射时,分光器与主光路之间的夹角,即布拉格角。

在分光器^[6]后端放置斩波器,在电机的带动下,斩波器将连续光调制成具有一定周期的脉冲光。

信号模拟单元产生的能谱为1~10 keV软X射线,覆盖了X射线脉冲星辐射的能谱范围,调

制的周期范围为10ms~300ms。

2.2 信号接收单元

由于正比计数器工艺简单、价格低廉,软X射线的能谱在其工作能区内,作为演示验证系统,探测器选用正比计数器,其功能满足基本需求。

信号采集单元由采集前端的信号调理模块、电脉冲捕获模块与网络传输模块组成。

捕获前信号调理的设计思路为:首先将微弱的光子电信号放大;再利用比较器,将噪声和一些非相关的信号去除;而后利用单稳态触发器和Schmitt触发器对一个光子产生的电脉冲进行整形,并在原电脉冲的上升沿附近产生两个子脉冲;最后通过二分频电路,在上升沿处,形成一个数字脉冲,如图3所示。

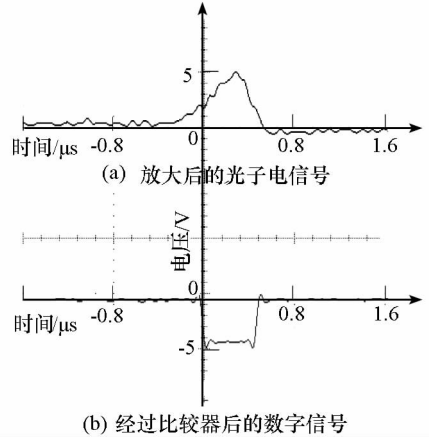


图3 模拟光子信号和数字光子信号

Fig. 3 Analog photon signal and digital photon signal

光子脉冲捕获模块与网络传输模块示意图如图4所示。光子脉冲捕获模块与网络传输模块的

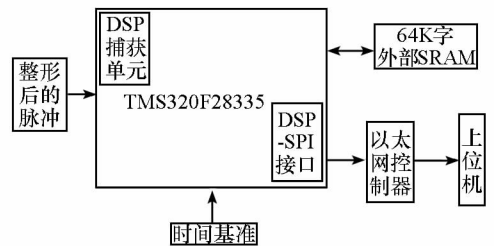


图4 光子脉冲捕获模块与网络传输模块示意图

Fig. 4 The photon pulsar capture and network transmission module

设计思路为:利用DSP2000^[7]系列中的捕获脉冲的模块及其四级捕获寄存器实现电脉冲捕获功能,当光子脉冲到达,经信号调理后,捕获模块记录光子脉冲上升沿所对应计数器的计时个数;然后,根据DSP的晶振频率和所设定的DSP倍频系数,计算出每个计数单位的时间,从而获得每个光子脉冲的到达时间,为保证系统可长期准确地运

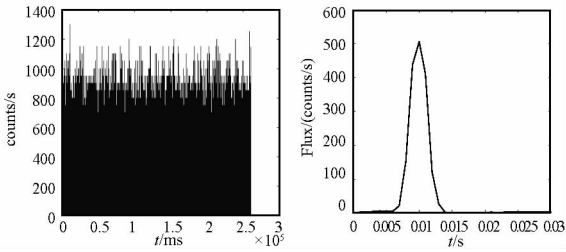
行,利用原子钟为处理器提供时间基准;最后将被捕获光子脉冲的时间信息,通过嵌入式网络 uIP^[8] 传输给信号处理单元。

整个系统如图 5 所示,接收单元接收到的光子结果如图 6 所示,图 6(a) 为接收光子的原始图,图 6(b) 为 150 个周期叠加后的波形恢复图。此脉冲信号源的周期值为 30ms,靶材的流量约为 500counts/s。



图 5 脉冲星导航仿真系统

Fig. 5 Pulsar navigation hardware-in-loop simulation system



(a) 接收光子的原始图 (b) 叠加后的波形恢复图

图 6 接收光子结果图

Fig. 6 Receiving photons and a single photon

由以上结果可以看出,设计的方案合理可行。系统能直接将光子的个数和单光子的到达时刻记录下来,可精确获得光子个数信息和整个脉冲的波形形状。此数据为惯性系下的光子到达时间,要得到航天器在轨接收光子到达时间,需将此数据结合航天器轨道动力学模型,利用(2)式解算出航天器在轨接收光子的光子到达时间数据。

$$t_{obs} = t_b - \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_k}{c} - \frac{2\mu_S}{c^3} \ln \left| \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_k + r_k}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{b} + b} + 1 \right| - \frac{1}{2cD_0} \left[\frac{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_k)^2 - r_k^2 + 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{b})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{r}_k)}{-2(\mathbf{b} \cdot \mathbf{r}_k)} \right] \quad (2)$$

2.3 导航估计单元

导航估计单元包含脉冲星数据库,TOA 估计模块和导航滤波模块。

在导航估计单元中,基本测量信息是脉冲到达时间(Time of Arrival),TOA 估计是整个导航估

计的基础,系统采用最大似然估计获得 TOA 估计大小。

将观测到的 X 射线脉冲星信号数据按照信号周期进行历元叠加恢复出的波形数据,结合轨道模型,解算出在轨观测的波形数据,用向量 \mathbf{X} 来表示,则信号模型可以描述为^[9]

$$\mathbf{X} = \mathbf{p} + \mathbf{n} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{R}_x(\tau) = E[\mathbf{X}(\tau)\mathbf{X}(\tau)^T] \\ \mathbf{R}_p(\tau) = E[\mathbf{p}(\tau)\mathbf{p}(\tau)^T] \\ \mathbf{R}_n = E(\mathbf{n}\mathbf{n}^T) \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_x(\tau) = \mathbf{R}_p(\tau) + \mathbf{R}_n \quad (5)$$

其中 \mathbf{p} 和 \mathbf{n} 是采集到的数据 \mathbf{X} 中包含的脉冲信号向量和噪声信号向量, $\mathbf{R}_p(\tau)$ 是脉冲信号的自相关矩阵, \mathbf{R}_n 是噪声向量的自相关矩阵。

建立关于数据向量 \mathbf{X} 的似然函数^[9]

$$p(\mathbf{X}|\tau) = \frac{1}{\pi^L \det(\mathbf{R}_n + \mathbf{R}_p(\tau))} \cdot \exp(e^{-\mathbf{X}^T(\mathbf{R}_n + \mathbf{R}_p(\tau))^{-1}\mathbf{X}}) \quad (6)$$

将(6)式取对数,则脉冲到达时间 τ 的极大似然估计为

$$\hat{\tau} = \arg \left\{ \min \left[\ln \det(\mathbf{R}_n + \mathbf{R}_p(\tau)) + \mathbf{X}^T(\mathbf{R}_n + \mathbf{R}_p(\tau))^{-1}\mathbf{X} \right] \right\} \quad (7)$$

(7) 式的理论估计性能可由 Carmer-Rao 限来衡量,它给出了估计误差均方差(MSE)的最小值,表达式为^[9]

$$\begin{aligned} \text{CRLB}(\tau) &= \frac{1}{E_{\mathbf{X}} \left| \nabla_{\tau} \ln p(\mathbf{X}|\tau) \right|^2} \\ &= \frac{1}{\text{tr} \left\{ [\mathbf{R}_x^{-1}(\tau) \nabla_{\tau} \mathbf{R}_p(\tau)]^2 \right\}} \end{aligned} \quad (8)$$

导航滤波模块的方案是利用上位机构建标准轨道模型和脉冲星相位时间模型,在 DSP 中构建真实的轨道模型、基于脉冲星相位时间模型的观测方程和滤波模型,DSP 与轨道模拟计算机通过串口连接,最后,DSP 解算的导航结果通过串口发送给演示上位机。算法流程图如图 7 所示。

3 试验与分析

3.1 接收信号的有效性评估

接收信号的有效性包括:周期的一致性;流量的一致性;波形的一致性。

周期与流量的一致性可以通过调整信号模拟系统的参数来保证,而波形一致性需通过获得调制波形后,比较调制波形与波形模板的试验数据来获得。

为验证系统模拟源的有效性,可利用相关性

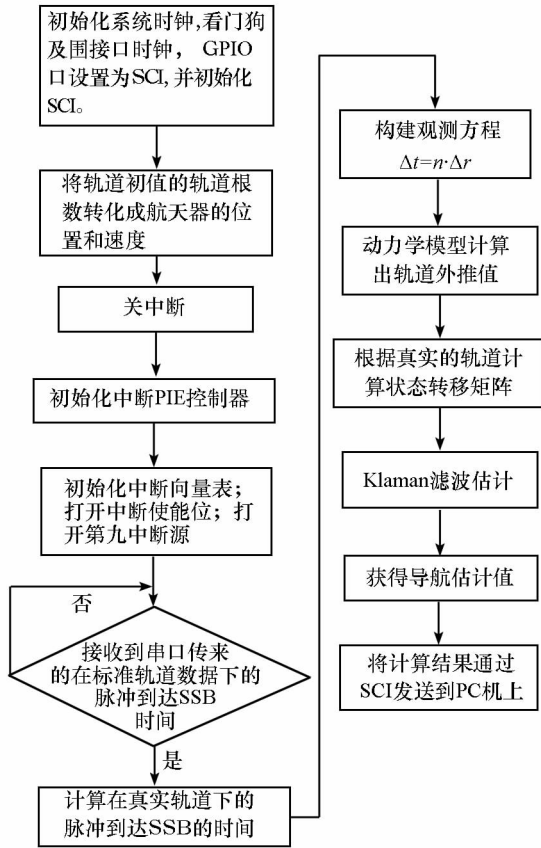


图 7 嵌入式导航算法流程图

Fig. 7 Flow chart for embedded navigation algorithm

函数,将模板波形与接收到的不同叠加次数的波形进行相关处理。相关函数为

$$\begin{aligned} \text{sim}(x, y) &= r(x, y) \\ &= \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{cov}(x, x) \cdot \text{cov}(y, y)}} \end{aligned} \quad (9)$$

其中:

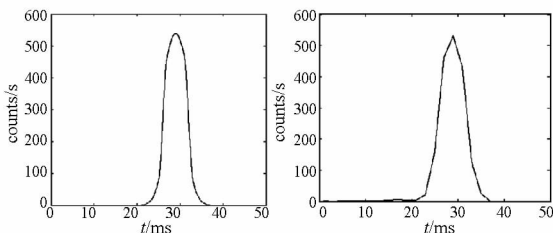
$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y});$$

$$\text{cov}(x, x) = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2;$$

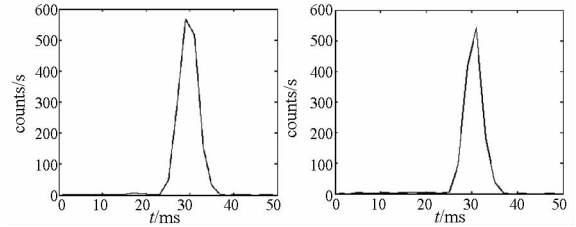
$$\text{cov}(y, y) = \frac{1}{n-1} \sum (y_i - \bar{y})^2.$$

斩波器设计的标准模板如图 8(a)所示,不同周期叠加后的波形所图 8(b)~图 8(d)所示。

由图 8 可知,在周期大小与流量峰值上,恢复后的波形与模板波形都保持了一致。



(a) 模板波形 (b) 160 个周期叠加后的波形



(c) 110 个周期叠加后的波形 (d) 80 个周期叠加后的波形
图 8 标准模板与不同周期叠加后的波形

Fig. 8 Template profile and profiles after folding

利用相关性公式,计算以上三个叠加波形与模板的相关性,相关系数如表 1 所示。

表 1 不同叠加周期波形与模板波形的相关系数
Tab. 1 Correlation between different periods folding signals and standard signal

叠加周期数	160	110	80
相关系数	0.982	0.962	0.932

由表 1 可知,随着叠加周期的增多,恢复的波形与模板波形的相关性也在不断增强,从而验证了恢复后的波形与设计波形的一致性。

3.2 TOA 估计算法验证试验与分析

利用半实物仿真系统检验基于极大似然估计的 TOA 算法的有效性。X 射线信号周期为 50ms,观测时间为 3000 个周期,探测器有效面积为 3cm²,调整射线源的工作电压和工作电流,使其产生不同的流量密度。在不同流量密度下,利用(7)式计算的 TOA 精度如表 2 所示。

表 2 不同流量情况下的 TOA 估计精度

Tab. 2 Estimation precision among different current intensities

Flux	50	300	1000
	Counts/s	Counts/s	Counts/s
ΔTOA/ms	3.3	1.2	0.42
Carmer-Rao/ms	2.5	0.9	0.35

从试验结果可以看出,随着脉冲信号流量密度的增加,TOA 估计精度逐渐提高,且基于极大似然估计的 TOA 估计与 Carmer-Rao 限相一致。这是由于在相同的时间内,接收到的脉冲波形光子越多,获得的源的信息就越详细,等效于提高信号波形的信噪比,此时得到的波形就越接近源的标准波形。因此,要想获得高精度的 TOA 估计,就要提高信噪比,并尽可能多地获得脉冲信号源的信息。

3.3 嵌入式导航算法验证

导航算法的硬件实现是整个半实物仿真系统的关键,本节通过实验验证所设计的导航算法在 DSP 中的有效性,算法流程图如图 7 所示。仿真

参数如下:标准轨道为中高轨轨道,轨道的半长轴 $a = 26378137$, 偏心率 $e = 0.1$, 轨道倾角 42° , 升交点赤经 0.0° , 近地点幅角 0.0° , 过升交点时刻 $0s$; 选择三颗脉冲星 PSR B1937 + 21, PSR B1957 + 20, PSR J0218 + 4232 作为导航计算使用的脉冲星, 具体参数如表 3 所示, TOA 估计精度为 $0.1\mu s$, 初始误差为 $(1000m, 1000m, 1000m)$, 仿真时间为 7h。

表 3 导航使用脉冲星的具体参数

Tab.3 Some parameters of pulsars using in navigation

脉冲星名称	银经/ $^\circ$	银纬/ $^\circ$	周期/s
B1937 + 21	57.51	-0.29	0.00156
B1957 + 20	59.20	-4.70	0.00160
J0218 + 4232	139.51	-17.53	0.00232

运算结果如图 9 所示。从仿真结果可以看出导航计算结果收敛, 说明导航算法能有效地在 DSP 中运行。

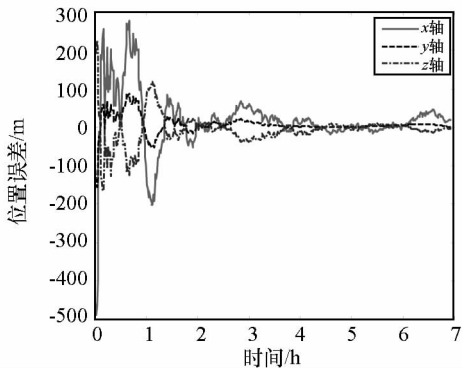


图 9 导航位置误差

Fig.9 Position error

4 结束语

本文构建了基于 X 射线脉冲星导航的地面

模拟系统, 实现了 X 射线脉冲星信号源的模拟, X 射线单光子计数的探测, 并对模拟源的有效性进行了初步评估, 验证了导航算法在 DSP 芯片上的有效性。下一步将采用半导体探测器, 更好地获得模拟脉冲星的能谱信息, 从而提高信号的信噪比; 考虑探测器的一些约束条件——探测器本底噪声、渡越时间、时间分辨率等, 获得更准确的光子到达时间和 TOA 估计; 将模拟信号与导航算法有机结合, 实时运行。

参考文献 (References)

- [1] Chester T J, Butman S A. Navigation using X-ray pulsars [R]. Washington: NASA, 1981.
- [2] Hanson J. Principles of X-ray navigation [D]. California: Stanford University, 1996.
- [3] Suneel I S. The use of variable celestial X-ray sources for spacecraft navigation [D]. Maryland: University of Maryland, 2005.
- [4] Emadzadeh A A, Robert A, Speyer J L. Navigation in space by X-ray pulsars [M]. New York: Springer, 2011.
- [5] Hanson J, Suneel I S, Paul G, et al. Noise analysis for X-ray navigation systems [C]//IEEE/ION PLANS ' 2008, California, 2008: 25 - 31.
- [6] 郑伟, 孙守明, 汤国建. 多周期性射线信号发生系统: 中国, 200910043352. 4[P]. 2009 - 10 - 04.
ZHENG Wei, SUN Shouming, TANG Guojian. Multi-period radial signal generator; China, 200910043352. 4[P]. 2009 - 10 - 04.
- [7] Texas Instruments Incorporated. TMS320F28335 digital signal controllers [EB/OL]. [2011 - 1 - 15]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf>.
- [8] Adam D. uIP - A free small TCP/IP stack [M]. New York: Springer, 2002.
- [9] Josep S, Andreu U, Xavier V. Feasibility study for a spacecraft navigation system relying on pulsar timing information[R]. Spain: ESA, 2004.