

Crab脉冲星X射线计时观测数据处理与分析*

杨廷高^{1,2†} 童明雷^{1,2} 赵成仕^{1,2} 高玉平^{1,2}

(1 中国科学院国家授时中心 西安 710600)

(2 中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600)

摘要 对我国公开发布的空间试验卫星X射线探测器观测Crab脉冲星的数据进行了处理与分析, 描述了利用X射线脉冲星观测数据与卫星轨道数据建立积分脉冲轮廓与标准脉冲轮廓的方法, 给出了在频域测量脉冲星脉冲到达时刻(toa)的原理方法与算法. 利用每组观测数据, 计算得到Crab脉冲星脉冲toa, 通过与Crab脉冲星星历预报脉冲toa的比较, 分析得到卫星载荷X射线探测器观测Crab脉冲星, 在消除掉系统误差后, 50 min积分时间的观测精度约14 μ s.

关键词 天体测量学, 脉冲星: Crab, 方法: 数据分析

中图分类号: P129; **文献标识码:** A

1 引言

我国于2016年11月发射了X射线脉冲星观测试验卫星, 我们对公开发布的该卫星观测Crab脉冲星的35组观测数据(<http://www.beidou.gov.cn/xpnavdata.rar>)进行了处理与分析. 首先, 利用卫星轨道参数、DE (Development Ephemeris)地球历表与英国射电计时观测得到的Crab脉冲星星历参数(<http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/Crab/>), 将每组观测得到的X射线光子到达卫星时刻转换成光子到达太阳系质心时刻. 再利用公开发布的全部可用观测数据, 构建标准脉冲轮廓. 利用每组观测数据建立积分脉冲轮廓. 将积分脉冲轮廓与标准脉冲轮廓进行离散傅里叶变换, 在频域内测量得到每组观测的脉冲星脉冲到达太阳系质心时刻(toa). 通过卫星观测得到的Crab脉冲星脉冲到达太阳系质心toa与星历表预报的同一脉冲到达太阳系质心toa比较与分析, 估计得到该卫星观测Crab脉冲星(50 min积分时间)的最好精度约14 μ s.

2 脉冲轮廓建立

公开数据共包括35组X射线光子到达卫星时刻观测数据与卫星轨道参数, 利用卫星

2017-08-10收到原稿, 2017-08-29收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U1531112, 11103024, 11373028, 11403030)、中国科学院“西部之光”青年学者项目(XAB2015A06)、中国科学院青年创新促进会项目(2017450)、陕西省青年科技新星项目(2015KJXX-56)资助

[†]yangtg@ntsc.ac.cn

轨道参数、美国JPL (Jet Propulsion Laboratory)发布的DE地球质心历表与英国发布的Crab脉冲星历表,将观测到的光子到达卫星时刻转换成到达太阳系质心时刻.然后,建立每组观测(积分时间为50 min)得到的积分脉冲轮廓,积分脉冲轮廓的建立以该组第一个光子到达时刻为起点进行脉冲周期折叠,再将折叠后一个自转周期内的相位划分为 M 个等间距的相位子间隔,每个相位子间隔及其所包含光子数构成的直方图就是积分脉冲轮廓^[1].构建标准脉冲轮廓采用全部可利用的35组观测数据,以便获得更高信噪比的脉冲轮廓,标准脉冲轮廓构建方法与积分脉冲轮廓基本相同,不同的是进行脉冲周期折叠时,采用Crab脉冲星历定义的脉冲主峰顶点对应的相位为起点(相位零点)进行周期折叠.标准脉冲轮廓与积分脉冲轮廓相位子间隔数必须相同.因为标准脉冲轮廓利用了更多观测数据,因而比积分脉冲轮廓具有更高信噪比.构建脉冲轮廓采用的Crab脉冲星历是英国发布的星历,该星历表每月进行更新,以便满足脉冲星观测数据分析需求.图1是由256个相位子间隔组成的Crab标准脉冲轮廓,利用英国射电脉冲星历与我国35组X射线观测数据构建而成.由图1可见,脉冲主尖峰的相位接近但并不等于0,这主要是由X射线与射电两个不同波段的差异引起的(观测数据是X射线波段,而构建标准脉冲轮廓参考的星历是射电观测提供的).图2是由256个相位子间隔构成的一个积分脉冲轮廓,其主脉冲尖峰的相位与标准脉冲轮廓尖峰的相位差就是我们要求解的相位延迟.求得的相位延迟加上积分脉冲轮廓的起始时刻就是观测得到的脉冲toa.

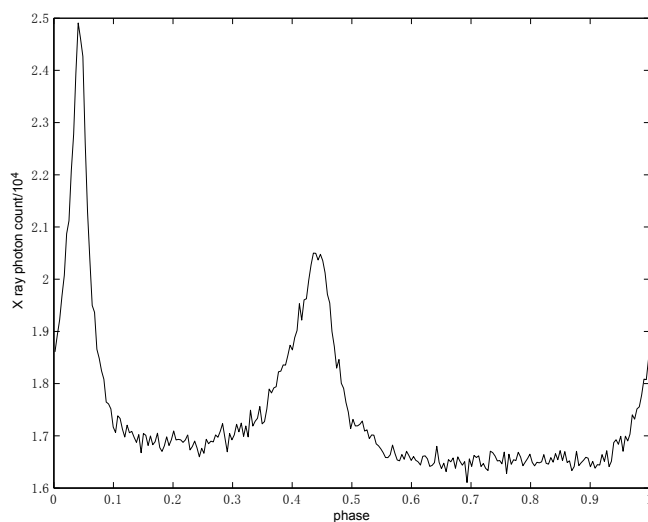


图 1 Crab脉冲星256个相位子间隔的标准脉冲轮廓

Fig. 1 The standard pulse profile with 256 phase bins for the Crab pulsar

3 脉冲toa测量与精度估计

利用转换到太阳系质心的X射线光子到达时刻,分3种情况测量脉冲toa,并评价其精度水平.

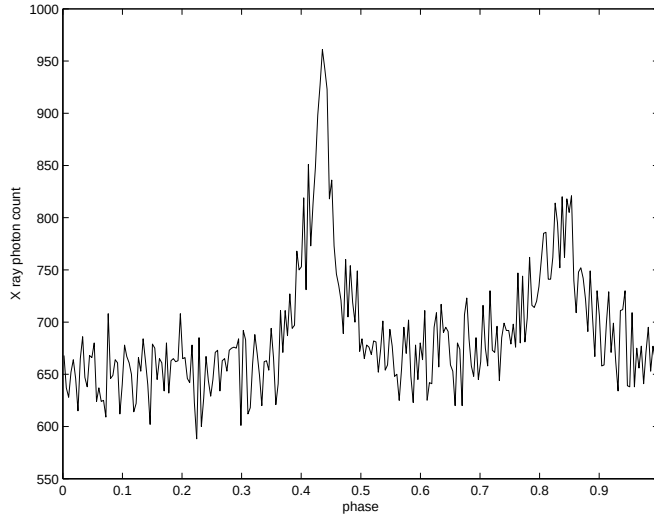


图 2 256个相位子间隔的积分脉冲轮廓

Fig. 2 The integration pulse profile with 256 phase bins

3.1 由128个相位子间隔的脉冲轮廓测量toa

按照上述脉冲轮廓构建方法, 由35组观测数据与已知的Crab射电观测星历表, 采用128个相位子间隔构建一个标准脉冲轮廓. 同时, 由35组观测分别再构建35个独立的包含128个相位子间隔的积分脉冲轮廓. 通过每个积分脉冲轮廓与同一个标准脉冲轮廓比较, 测量每个积分脉冲轮廓对应的脉冲toa. 脉冲toa测量有多种方法, 我们主要采用在频域的toa测量方法^[2-3]. 对于Crab脉冲星, 观测得到的积分脉冲轮廓 $p(t)$ 与事先建立好的同一能量波段的标准脉冲轮廓 $s(t)$ 的关系可表示为:

$$p(t) = a + bs(t - \tau) + g(t), \quad (1)$$

其中, a 是待定常数, b 是比例因子, τ 是时间偏离, $g(t)$ 表示随机噪声. (1)式中, $0 \leq t \leq P$, P 是观测时刻Crab脉冲星的自转周期. 通过对 $p(t)$ 和 $s(t)$ 的离散傅立叶变换, 在频域进行二者间的相关分析, 可高精度确定(1)式中 τ . 假设 P_k 、 S_k 是 $p(t)$ 、 $s(t)$ 离散傅立叶变换第 k 个频率复系数的幅度, θ_k 和 ϕ_k 是相位, M 是相位子间隔数, 根据 $p(t)$ 与 $s(t)$ 关系式(1)式, 利用傅立叶变换的线性和时域平移特性, 有:

$$P_k \exp(i\theta_k) = aM + bS_k \exp[i(\phi_k + 2\pi\nu k\tau)] + G_k, k = 0, 1, \dots, M-1, \quad (2)$$

其中, ν 是观测时刻脉冲星自转频率, 随机噪声 G_k 等于时域采样噪声的傅立叶变换. (2)式中, aM 是常数项, 为计算 τ , 令:

$$\chi^2(\tau) = \sum_{k=1}^{M/2} \left| \frac{P_k - bS_k \exp[i(\phi_k - \theta_k + 2\pi\nu k\tau)]}{\sigma_k} \right|^2, \quad (3)$$

其中, σ_k 是与 k 对应的频率分量的噪声, 实际上, 各个频率分量噪声变化很小, σ_k 可视为

常数 σ . 绝对值符号意味着复数取模运算, 由(3)式得到:

$$\chi^2(\tau) = \sigma^{-2} \sum_{k=1}^{M/2} (P_k^2 + b^2 S_k^2) - 2b\sigma^{-2} \sum_{k=1}^{M/2} P_k S_k \cos(\phi_k - \theta_k + 2\pi\nu k\tau). \quad (4)$$

为使 $\chi^2(\tau)$ 最小, $\chi^2(\tau)$ 对 τ 的导数应等于0, 即:

$$\sum_{k=1}^{M/2} k P_k S_k \sin(\phi_k - \theta_k + 2\pi\nu k\tau) = 0. \quad (5)$$

利用(5)式, 采用迭代方法计算 τ ^[4]. τ 的近似值最好通过积分脉冲轮廓与标准脉冲轮廓在时域互相关估计得到. 再将 τ 的近似值作为采用值, 利用(5)式采用迭代算法求解 τ 的精确值. 最后将观测起始时刻加上 τ 就得到脉冲toa. 该方法优点是toa测量误差与建立脉冲轮廓的相位子间隔数量无关. 考虑到当前X射线光子计数测量信噪比较低, 不能建立包含较多(如1024或更多)相位子间隔的脉冲轮廓, 因而选用在频域测量toa的技术与方法是合适的. 利用该方法, 我们分别测量得到35组X射线观测的脉冲toa. 应该指出的是: 虽然35组观测积分时间都是50 min左右, 但由于卫星所处空间位置不同、目标源被遮挡情况不同等因素, 各组之间观测信噪比是很不一致的. 利用测量得到的35个独立测量的脉冲toa, 通过与Crab星历表预报toa的比较, 得到每次观测的残差如图3所示. 由图3可见: 残差呈现明显系统性变化趋势, 通过拟合二次曲线, 即参考星历表频率与频率一阶导数改正值, 可以消除这种系统性变化趋势. 消除掉系统性趋势后的残差称为拟合后残差. 拟合后残差的弥散度为42 μ s. 由图3还可看出: 有些数据点的残差具有较大偏离, 去掉残差绝对值大于3倍弥散度以上的观测, 即观测序号为1、3、4、6、30与34的6组观测后, 利用剩余29组有效观测, 重新计算拟合后的残差, 其弥散度为23 μ s.

应该指出的是, 英国发布的Crab脉冲星星历参数(特别是自转参数)是采用(太阳系)质心力学时TDB进行归算的. 目前国际上脉冲星计时数据分析(如Tempo2软件系统)都采用质心坐标时TCB, 不再采用TDB. TDB与TCB之间不存在周期性差异, 只存在线性速率差, 根据国际天文学联合会(IAU) 2006年大会决议, 二者间关系定义为:

$$\text{TDB} = \text{TCB} - L_B \times (\text{JD}_{\text{TCB}} - T_0) \times 86400 + \text{TDB}_0, \quad (6)$$

其中, JD_{TCB} 是用TCB时间尺度表示的儒略日数, $T_0 = 2443144.5003725$, L_B 与 TDB_0 是两个定义常数, $L_B = 1.550519768 \times 10^{-8}$, $\text{TDB}_0 = -6.55 \times 10^{-5}$ s. 由(6)式可见: 由于这两种时间尺度之间存在线性速率差, 由脉冲星计时观测数据分析脉冲星自转参数(包括自转频率及其一阶导数)时, 如果采用TDB时间尺度进行归算, 得到的脉冲星自转参数结果与采用TCB的归算结果是不同的. 我们在处理我国X射线脉冲星试验卫星观测Crab数据时, 采用基于TCB时间尺度的Tempo2软件, 将观测到的X射线光子到达卫星时刻转换为到达太阳系质心时刻, 但采用的脉冲星星历, 即预报Crab脉冲到达太阳系质心时刻的模型参数却是基于TDB时间尺度的星历参数(因为目前没有更合适的Crab星历参数可用), 这可能是导致图3中残差呈现系统性变化趋势的主要原因. 其次, Crab脉冲星星历参数归算参考的是美国JPL DE200太阳系天体历表, 与近代DE历表比较, DE200系统误差较大, 也会对图3中的系统性变化趋势产生一定影响.

3.2 由256个相位子间隔的脉冲轮廓测量toa

将构建脉冲轮廓相位子间隔数目再提高一倍,即采用256个相位子间隔的脉冲轮廓进行脉冲toa测量,其数据处理方法与3.1节相同.去掉偏离较大的序号为1、3、4、6、11、19、22与34的8组观测后,由其余27组有效观测的脉冲toa得到拟合前残差弥散度为 $34\ \mu\text{s}$.图4是消除掉系统性趋势前(拟合前)的计时残差分布图.消除掉系统性趋势的拟合后计时残差弥散度为 $14\ \mu\text{s}$. $14\ \mu\text{s}$ 精度可代表我国X射线脉冲星空间试验观测(50 min积分时间)的最高精度水平.

3.3 由512个相位子间隔的脉冲轮廓测量toa

进一步,我们利用512个相位子间隔的脉冲轮廓测量脉冲toa,去掉偏离较大的观测后,只得到24组有效观测,其拟合后计时残差弥散度为 $89\ \mu\text{s}$.残差弥散度明显大于前二者,说明了采用512个相位子间隔的脉冲轮廓信噪比太低,在观测噪声影响下不能够正确地测量脉冲toa.

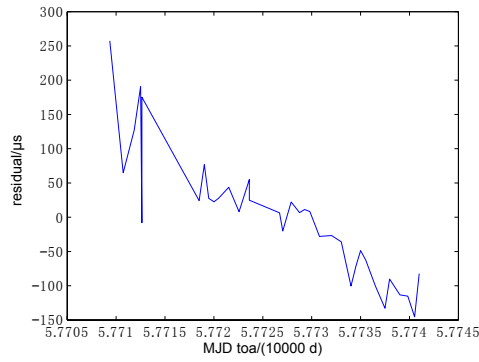


图 3 由128个相位子间隔脉冲轮廓测量得到脉冲toa的残差

Fig. 3 The timing residuals of pulsar toa from the Crab pulse profile with 128 phase bins

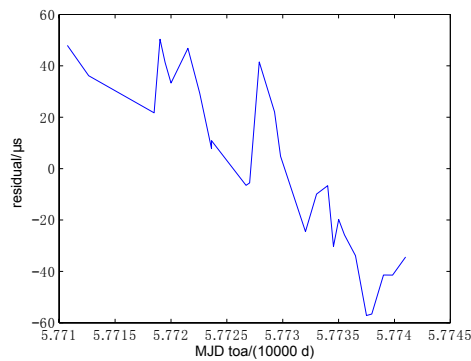


图 4 由256个相位子间隔脉冲轮廓测量得到脉冲toa的残差

Fig. 4 The timing residuals of pulsar toa from the Crab pulse profile with 256 phase bins

4 讨论与结论

上述3种情况测量脉冲toa结果表明: 根据X射线观测信噪比水平, 选择合适的相位子间隔构建脉冲轮廓非常重要. 根据我国X射线脉冲星试验观测实际情况, 选择256个相位子间隔构建脉冲轮廓是测量脉冲toa的最佳方案.

在脉冲轮廓相位子间隔数量较低的情况下, 应该采用在频域进行脉冲toa测量的方法. 实践证明: 采用该方法, toa测量误差与构建脉冲轮廓的相位子间隔数量几乎无关, 即使采用128或256个相位子间隔的脉冲轮廓, 仍能得到高精度的脉冲toa测量结果.

采用256个相位子间隔(子间隔时间宽度相当于 $132\ \mu\text{s}$)的脉冲轮廓, 去掉偏离大于3倍均方根弥散度的错误观测、消除掉计时残差的二次多项式系统性误差后, 我们得到 $14\ \mu\text{s}$ 的计时残差弥散度. 这代表X射线探测器观测Crab脉冲星50 min积分时间所能达到的最高精度水平. 这表明: 在观测信噪比较低的情况下, 通过适当延长积分时间、选择合适的数据处理方法也能取得相对满意的脉冲toa测量精度.

仔细检查因偏离较大而删除掉的几组观测数据, 发现它们的积分脉冲轮廓由于噪声的扰动都存在程度不同的畸变, 因而导致了错误的结果. 总的观测出错率约20%. 在目前的X射线探测器性能条件下, 通过改进观测方案、尽量减小天空背景噪声扰动, 从而进一步减小出错率是个值得重视的问题. 当然, 进一步改进探测器本身的性能, 从而提高观测信噪比更是X射线脉冲星空间试验观测的关键问题.

考虑到英国发布的Crab星历表参数是参考美国JPL DE200太阳系天体历表、在TDB时间尺度系统下归算得到的, 由于DE200太阳系天体历表具有较大误差, TDB时间尺度已经被质心坐标时TCB取代, 因此我们建议: 积极开展利用我国脉冲星计时观测设备进行Crab与其他具有导航应用潜力的脉冲星的射电计时观测工作, 并在数据分析处理与脉冲星星历参数归算时采用TCB时间尺度与近代新发布的较高精度DE历表, 以便满足我国X射线脉冲星空间计时观测研究工作的需求.

参考文献

- [1] Sheikh S I, Pines D J, Ray P S, et al. JGCD, 2006, 29: 49
- [2] Taylor J H. PTRSL, 1992, 341: 117
- [3] 杨廷高. 空间科学学报, 2008, 28: 330
- [4] Press W H, Flannery B P, Teukolsky S A, et al. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1986

Process and Analysis of X-ray Timing Data for Crab Pulsar

YANG Ting-gao^{1,2} TONG Ming-lei^{1,2} ZHAO Cheng-shi^{1,2} GAO Yu-ping^{1,2}

(1 National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

(2 Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

ABSTRACT The X-ray timing data for the Crab pulsar obtained by the Chinese X-ray pulsar navigation test satellite are processed and analyzed. A creation method for integration and standard X-ray pulse profiles for the Crab pulsar is described by using the X-ray timing data of the satellite and the Crab pulsar ephemeris from the radio timing observations. The principle and algorithm for determining the pulsar pulse time of arrival (toa) in the frequency domain are briefly introduced. The pulsar pulse time of arrival is calculated by using the timing data of 50 min integration for each group observations. By the comparison between the observed Crab pulsar pulse time of arrival at the solar system barycenter and that predicted with the Crab pulsar ephemeris, we found that the accuracy of timing residuals is about $14 \mu\text{s}$ after the systematic trend is removed by a quadratic polynomial.

Key words astrometry, pulsars: Crab, methods: data analysis