

# 非等间隔计时数据的 X 射线脉冲星周期快速搜索算法\*

周庆勇<sup>1)2)†</sup> 姬剑锋<sup>1)2)</sup> 任红飞<sup>1)2)</sup>

1) (地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

2) (西安测绘研究所, 西安 710054)

(2012 年 3 月 10 日收到; 2012 年 8 月 13 日收到修改稿)

利用 X 射线脉冲星信号的计时信息实现航天器深空导航具有重要意义, 精确的时间模型 (周期及周期导数) 是获得高精度自主导航的基础. 针对 X 射线光子并非等间隔地到达探测器的特点, 在对比分析两种非等间隔数据处理方法 ( $\chi^2$  量评估方法和 Lomb 算法) 的基础上, 提出了用 Lomb 算法估计脉冲星周期初值, 进一步使用  $\chi^2$  量评估方法精化周期值的方法. 同时运用快速傅里叶变换算法的思想对 Lomb 算法进行改进, 较大地提高了程序的运算效率. 最后利用 X 射线源仿真系统的计时数据对算法进行试验分析, 搜索出准确的脉冲星周期和折叠出正确的脉冲轮廓.

**关键词:** 脉冲星导航, 轮廓折叠, 快速傅里叶变换, X 射线源仿真系统

**PACS:** 97.60.Gb, 07.85.-m, 07.05.kf

**DOI:** 10.7498/aps.62.019701

## 1 引言

当前全球卫星导航系统 (GPS) 精密单点定位的主要误差源有星历误差和钟差, 任何提高卫星轨道精度和星载钟稳定度的方法都将直接有利于提高用户导航定位精度. 现有研究建议使用可能的信号来提高 GPS 卫星轨道确定与钟差估计算法的精度及鲁棒性, 这种信号可以来自于 X 射线脉冲星<sup>[1]</sup>. 基于 X 射线脉冲星的航天器自主导航是当前国内外的一个研究热点.

相比于现有的导航定位系统, X 射线脉冲星导航系统的优势及意义如下<sup>[2,3]</sup>: 1) 能够提供高稳定度的时间频率源; 2) 扩大深空探测及深空测绘的范围; 3) 有效地提高航天器的自主导航能力; 4) 提高抗干扰能力; 5) 系统较为简单, 维护成本较低, 可作为现有导航系统的备份. 鉴于脉冲星导航的发展前景以及将来的军事应用, 美国国防部于 2004 年 8 月实施了“基于 X 射线源的自主导航定位计划

(XNAV)”, 欧空局和俄罗斯也提出了类似的计划<sup>[2]</sup>, 我国的脉冲星导航研究尚处于起步阶段.

基于 X 射线脉冲星航天器自主导航的基本观测测量是 X 射线光子到达探测器的时间 (TOA), 故 TOA 的测量精度直接影响脉冲星导航结果. TOA 是通过探测器收集的光子处理得到脉冲轮廓与数据库中标准的脉冲轮廓模板进行比较得到, 可见 TOA 精度主要与探测器的性能、脉冲星轮廓折叠算法、标准脉冲轮廓模板误差等有关. 而脉冲星轮廓的生成需要准确的脉冲星周期作为参考, 故脉冲星的周期搜索以及轮廓折叠是影响 TOA 精度的重要因素之一.

国内外很多学者对基于等间隔计时数据的射电脉冲星周期搜索做了深入研究. 美国国家天文台的研究员 Burn 和 Glark 对射电脉冲星搜索过程中快速折叠算法 (FFA) 和快速傅里叶变换 (FFT) 算法进行系统分析<sup>[4]</sup>; 哈佛大学的 Ransom 等<sup>[5,6]</sup>提出了一种调相搜索技术能够发现短周期脉冲双星;

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41004013, 41174025, 41204020) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zjlzqy1986@163.com

西安理工大学的李建勋等<sup>[7]</sup>提出了最大相关方差搜索法的射电脉冲星周期估计算法,并进行了仿真计算.国内还有一些学者采用信号处理理论对脉冲星信号辨识、脉冲星标准轮廓累积等做了大量研究<sup>[8]</sup>.然而航天器上探测器记录X射线光子到达事例,包含光子的到达时刻和能量等信息,由于受到脉冲星辐射机制和光子传播过程中各种效应的影响,X射线光子并非等间隔到达探测器,使用经典算法处理该数据可能得到不够理想的结果.本文主要研究了一种处理非等间隔脉冲星计时数据的周期搜索算法,并用X射线源仿真系统采集的计时数据进行验证分析.

## 2 非等间隔计时数据的数据处理

在科学实验和实际工程中,获得的大部分是均匀采样的数据,可以使用傅里叶变换、功率谱估计等方法快速地进行处理<sup>[9]</sup>.而在脉冲星导航数据处理中,往往关注的是X射线光子的时变信息,时变信息一般采用高精度的本体晶振或GPS的时间系统进行授时.同时脉冲星辐射的光子并非等间隔地到达航天器,故脉冲星导航处理的计时数据不是我们熟悉的等间隔数据.

频谱分析方法在处理等间隔的计算数据具有计算速度快等优点,故可将非等间隔的计时数据先平滑插值处理为等间隔的数据,再使用诸如FFT算法进行快速处理.但如此做法有以下缺陷:1)插值后的采样值不能反映真实的时间序列,而且在频谱分析时难免会产生频率漂移现象,如对大步跳跃的数据插值处理可能导致功率谱在低频成分处产生伪凸起<sup>[10]</sup>;2)平滑过程会将一些高频信号滤掉,而某些观测目的就是为了分析高频信号,如甚长基线干涉测量(VLBI)的连续加密观测;3)有些插值技术并不可靠,本文处理的计时数据就面临需要插补几十倍甚至上百倍的原数据量;4)观测数据采样间隔分布极不均匀,如果采用平滑插值,其平滑的尺度因子难以确定<sup>[11]</sup>.因此对于非等间隔的脉冲星计时数据,最好采用非等间隔频谱分析手段来处理,这类分析方法有Lomb算法、Clean算法、Wavlet算法等<sup>[11]</sup>.下面首先介绍在X射线巡天观测中搜索脉冲星的 $\chi^2$ 量评估方法,然后重点研究了Lomb算法对非等间隔数据的处理.

### 2.1 $\chi^2$ 量评估方法

X射线巡天观测肩负着发现新X射线源的任务,没有准确的脉冲周期参数可供参考<sup>[2]</sup>.为了解决该问题,在进行X射线观测数据处理时,可在一定周期范围内基于 $\chi^2$ 量准则进行周期搜索,计算得到对应当前时刻的脉冲星周期.该方法也称为 $\chi^2$ 量评估方法,已经应用于Heasoft软件对Rossi X射线时变探索者(RXTE)卫星的X射线观测数据处理中.

$\chi^2$ 量评估方法的基本原理见图1.对于一段光子到达时间序列(观测持续时间为 $t$ ),将其按照试验周期 $T$ 分成 $M$ 段( $M \equiv t/T$ ),再将每段分成 $N$ 份(Bin数),相当于将一个周期相位分成 $N$ 部分,每一部分光子计数 $n_i$ .以试验周期 $T$ 循环计算每个光子的相位,然后将后面的 $M-1$ 段叠加到第一段上,并要求相位相同的光子叠加到同一个相位上,得到第 $i$ 个相位内光子计数为 $N_i$ .统计整个时间序列的泊松量 $\chi^2$ 值:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^M (N_i - \bar{N})^2, \quad (1)$$

其中 $\bar{N}$ 为平均光子数.

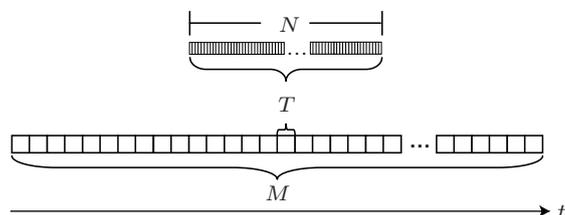


图1 搜索最佳周期示意图

脉冲星具有极其稳定的自转周期,且大多数脉冲星在一个周期的极短时间内存在较强的辐射,在脉冲轮廓中呈现峰值状态<sup>[12]</sup>.采用 $\chi^2$ 量评估方法进行周期搜索,如果采用正确周期进行折叠时,那么 $\chi^2$ 值最大.如果试验周期不准确,即按照不准确的周期进行折叠,相当于将多个周期的光子数进行了平均, $\chi^2$ 值较小.故在较大的数值范围内,试验所有的周期会得到不同的 $\chi^2$ 值,取 $\chi^2$ 值最大对应的周期值作为脉冲星最佳自转周期,同时由光子分布情况可得脉冲轮廓.需要注意的是,若对地面天线或探测器得到的脉冲星计时数据使用 $\chi^2$ 量评估方法搜索周期,需将数据归算至太阳系质心处再进行处理,否则会产生较大的误差<sup>[2]</sup>.

使用 $\chi^2$ 量评估方法估计脉冲星的周期,没有

准确的周期值作参考,需要在较大的周期范围内进行搜索,然后以  $\chi^2$  量作为指标将周期搜索范围不断缩小,甚至搜索到满足要求的脉冲周期值,折叠出正确的脉冲轮廓.可见周期搜索初值的范围以及循环次数是制约  $\chi^2$  量评估方法运算速度的主要因素,故若能准确地估计周期搜索范围可以大大减少  $\chi^2$  量评估方法的运算量,该问题可以通过非等间隔的频谱分析方法较好地解决.

## 2.2 非均匀计时数据的频谱分析——Lomb 算法

对于非均匀采样数据处理最好采用非等间隔频谱分析方法,其能够克服插值算法的缺陷,并且具有一些较好的效果.常用的非间隔频谱分析方法有 Lomb 算法等,Lomb 算法由 Lomb 在 Baring 等研究结果的基础上创立并发展,并由 Scargle 进一步完善 [10,13,14].

假设一共有  $N$  个计时观测量  $h_i \equiv h(t_i) (i = 0, \dots, N-1)$ ,可首先估算其均值和方差:

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} h_i, \quad \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (h_i - \bar{h})^2. \quad (2)$$

Lomb 归一化周期图 (功率谱为角频率  $\omega = 2\pi f > 0$  的函数) 定义如下 [13,14]:

$$P(\omega) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{[\sum_j (h_j - \bar{h}) \cos \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{[\sum_j (h_j - \bar{h}) \sin \omega(t_j - \tau)]^2}{\sum_j \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}, \quad (3)$$

其中  $\tau$  由下式确定:

$$\tan(2\omega\tau) = \frac{\sum_j \sin 2\omega t_j}{\sum_j \cos 2\omega t_j}. \quad (4)$$

常数  $\tau$  是一种偏移量,其使得  $P(\omega)$  在所有  $t_j$  移动一个常数时不变.这种偏移量的选择具有重要的意义 [13]:它使 (3) 式与通过最小二乘法对给定频率  $\omega$  的谐振信号估计得到的等式是一致的.同时 Lomb 算法对计时数据的估计是建立在“各计时时刻”的基础上,而不是建立在“每一个时间间隔”上,而后者在非等间隔采样时往往会带来较大的误差,这也是 Lomb 算法能够比 FFT 算法得到更准确的计算结果的原因 [10].

程序实现 Lomb 归一化周期图的过程是简单的和直接的,然而 Lomb 算法是一个运算速度很慢的算法.通常处理具有  $N$  个脉冲信号的到达时间

序列,希望得到  $2N$  乃至更多 ( $4N, 8N$  等) 个频率点.在 (3) 式和 (4) 式中,每次频率和计时数据的运算不仅是几次调用加法和乘法,而且是四次调用三角函数,整个程序运算量很容易达到  $N^2$  的几百倍.用递归代替这些三角函数的调用是一个不错的想法,可使运算速度提高 4 倍,但这种算法仅在被检测的时间序列是线性序列才有效率,而且在整体上提高的效果不佳.

FFT 算法具有快速的计算速度,广泛地应用于数字信号处理中.可以尝试使用 FFT 算法的思路对 Lomb 算法进行改进,以提高计算速度.

## 2.3 快速的周期搜索算法——改进的 Lomb 算法

算法的改进主要对 (3) 式和 (4) 式近似处理得到,同时这种近似能够满足大多数所需的精度,且运算量大大减少,约为  $N \log N$  数量级.改进的 Lomb 算法在计算过程中使用 FFT,但并不是直接对计时数据进行 FFT 频谱分析,实际上是对 (3) 式和 (4) 式即 Lomb 归一化周期的估计,故同时具有 FFT 算法的优缺点 [10,15].

改进 Lomb 算法的思路 [10]: (3) 式和 (4) 式中的三角函数求和可以简化 4 个函数的求和

$$S_h = \sum_{j=0}^{N-1} (y_j - \bar{y}) \sin(\omega x_j),$$

$$C_h = \sum_{j=0}^{N-1} (y_j - \bar{y}) \cos(\omega x_j), \quad (5)$$

$$S_2 = \sum_{j=0}^{N-1} \sin(\omega x_j),$$

$$C_2 = \sum_{j=0}^{N-1} \cos(\omega x_j), \quad (6)$$

那么

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{N-1} (y_j - \bar{y}) \cos \omega(x_j - \tau) \\ &= C_h \cos(\omega\tau) + S_h \sin(\omega\tau), \\ & \sum_{j=0}^{N-1} (y_j - \bar{y}) \sin \omega(x_j - \tau) \\ &= S_h \cos(\omega\tau) - C_h \sin(\omega\tau), \\ & \sum_{j=0}^{N-1} (y_j - \bar{y}) \cos^2 \omega(x_j - \tau) \\ &= \frac{N}{2} + \frac{1}{2} C_2 \cos(2\omega\tau) + \frac{1}{2} S_2 \sin(2\omega\tau), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=0}^{N-1} (y_j - \bar{y}) \sin^2 \omega(x_j - \tau) \\ &= \frac{N}{2} - \frac{1}{2} C_2 \cos(2\omega\tau) - \frac{1}{2} S_2 \sin(2\omega\tau), \end{aligned} \quad (7)$$

如果脉冲到达时间序列  $t_j$  是均匀等间隔的, 那么  $S_h, C_h, S_2, C_2$  可用两个复数的 FFT 计算, 结果代入 (7) 式, 再由 (7) 式估算 (3) 式和 (4) 式, 可得 Lomb 归一化周期图.

如何在非等间隔的数据点处对 (5) 式和 (6) 式进行估算? 通常采用插值或扩展插值等方法. 插值使用在一规则网络上的几个函数值来构造任意点处的精确近似值. 扩展插值恰好相反, 它是用规则网络上的几个函数值代替任意点上的函数值, 并使网络上各点之和是原来任意点之和的精确近似, 故扩展插值的权函数等价于一般插值的权函数<sup>[9,10]</sup>. 假设要插值的函数  $h(t)$  仅在离散点上知道其值  $h(t_i) = h_i$ , 而函数  $g(t)$  在任意处都能估计其值. 令  $\hat{t}_k$  为一个规则网络上均匀间隔的点序列, 拉格朗日插值给出一个近似表达式:

$$g(t) \approx \sum_k w_k(t) g(\hat{t}_k), \quad (8)$$

其中  $w_k(t)$  是插值的权函数.

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{N-1} h_j g(t_j) &\approx \sum_{j=0}^{N-1} h_j \left[ \sum_k w_k(t_j) g(\hat{t}_k) \right] \\ &= \sum_k \left[ \sum_{j=0}^{N-1} h_j w_k(t_j) \right] g(\hat{t}_k) \\ &\equiv \sum_k \hat{h}_k g(\hat{t}_k), \end{aligned} \quad (9)$$

上式使用规则网络上的和值代替原先的和值. (9) 式的精确度取决于函数  $g(t)$  划分的网格精细程度, 与时间点  $t_j$  的间隔、函数  $h(t)$  无关, (8) 式的精确度也具有这种性质.

改进的 Lomb 算法计算步骤归纳如下:

- 1) 选择一个能容纳所需过量采样因子的较大网格, 另外在最高频率的每半个波长处取几个外插值点;
- 2) 在网格上外插值  $h_i$ , 并且进行 FFT 计算, 得到 (5) 式中的  $S_h$  和  $C_h$ ;
- 3) 将常数 1 外插到另一个网格上, 同样进行 FFT 计算, 运算得到 (6) 式中的  $S_2$  和  $C_2$ ;
- 4) 依次估计 (7) 式、(4) 式和 (3) 式, 绘制出归一化周期图.

### 3 算例分析

本文通过 X 射线源仿真系统采集的数据, 对上述算法进行验证分析.

#### 3.1 X 射线源仿真系统

为搭建脉冲星导航的地面仿真演示系统, 西安测绘研究所和中国科学院高能物理研究所合作研制了 X 射线源仿真系统. 目标是建立一套仿真效果好、简单易用的 X 射线源仿真系统, 该系统可用于标定 X 射线探测器的性能, 也可作为将来搭建地面仿真系统的核心部件. 目前已初步搭建了系统原形, 相关测试工作基本完成. 系统的整体结构如图 2 所示.

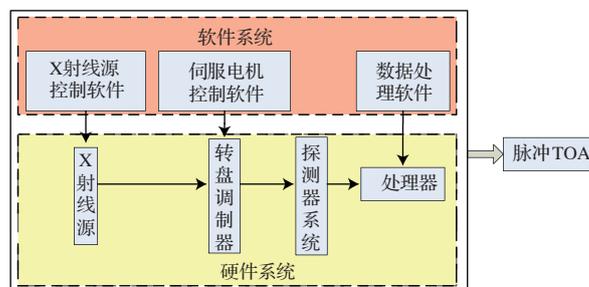


图 2 X 射线源仿真系统结构示意图

X 射线源仿真系统的工作原理是: 通过调制 X 光管的功率, 控制辐射出 X 射线光子的能道和流量, 产生类似于脉冲星的辐射信号. 让该信号经过由电机控制的转盘调制器产生周期性的脉冲信号, 信号的周期由电机的转动周期准确地控制, 调制好的信号被探测器系统接收, 经数据采集系统读出后由数据处理软件处理形成脉冲轮廓并得到 TOA.

系统采集的数据主要包括 CCD (一种 X 射线探测器) 触发的信号和 GPS 秒脉冲信号, 这些信号经数据采集系统接收、放大, 采样量化后, 打包发送至 PC 机, 生成数据文件. CCD 记录 X 射线光子的到达时刻一般采用本体晶振, 由于本体晶振的稳定度相对不高, 常采用 GPS 时间系统进行校时. 现以某一时段系统实测计时数据为例, CCD 触发的能道与计时数据如图 3.

图 3 中的数据在能量分布上存在明显的分界, 这主要与 CCD 性能有关. 低压信号源主要来自 CCD 内部的暗电流, 对应于系统噪声; 高压信号源主要来自 X 射线光子的到达响应, 对应于 X 射线源辐射光子的量化能量. 在数据预处理中, 首先要

剔除 0.5 V 以下的能道数据, 将 1 V 以上的能道数据认为 X 射线源信号. 本文将采用 X 射线源仿真系统产生的计时数据对上述算法进行验证.

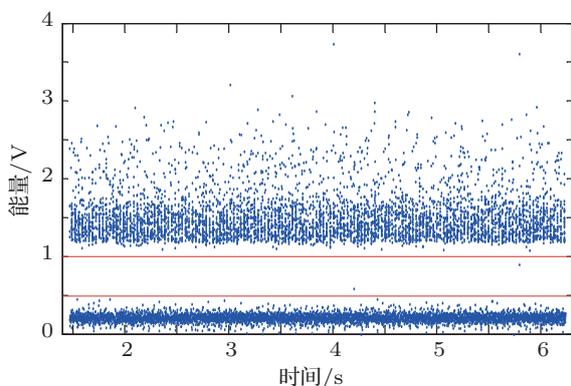


图3 CCD 触发的能道与时间数据

### 3.2 算例验证与分析

#### 3.2.1 算例一: $\chi^2$ 量评估方法

本算例采用  $\chi^2$  量评估方法搜索估计模拟脉冲星的周期, 并折叠出脉冲轮廓. 首先使用 X 射线源仿真系统对 Crab 脉冲星进行 1 h 仿真观测得到 3958827 个有效的 X 射线光子到达时间数据, 平均流量密度为 1100.7160 ph/s. 在  $\chi^2$  量评估方法搜索周期过程中, 初始周期设置为 0.033 ms, 搜索范围为 0.0330—0.0339 s, 将每个试验周期分成 2000 bins, 搜索得到周期值为 0.03312496997 s, 其轮廓示意图见图 4. 中国科学院高能研究所给出一个参考结果, 其观测时间约为 9.8 s, 平均光子流量为 2768.3 ph/s, 估计得到的周期为 0.03312412482 s. 两者结果相差 845.15 ns, 细微的差距可能与观测条件有关.

为进一步分析不同的观测时间长度对周期搜索的影响, 针对同一观测文件, 由不同的观测时间长度搜索得到的最佳周期如表 1. 表 1 中不同观测时长的最佳周期最大互差为 16 ns, 最佳周期随观测时间的增加而减小, 平均流量随观测时间的增加而增大. 周期和平均流量随观测时间的变化趋势与系统各组件的性能有关, 需要进一步优化.

使用  $\chi^2$  量评估方法确定周期, 运算速度快慢取决于运算过程中的循环次数. 而循环次数与周期初值的范围和每个周期分成 Bins 的数量息息相关. 如果周期初值范围越大, 并且周期步长越小, 计算量越大; 同时将每个周期划分成子区间越多, 计算量越大. 为了减少计算量, 本文使用一些技巧, 在一个搜索区间内, 搜索步长为整个区间长度的二十

分之一, 依次计算  $\chi^2$  量, 取  $\chi^2$  量最大对应的周期值作为当前周期. 再进一步搜索时, 取当前周期相邻的两个值的区间为下一个搜索区间, 如此循环甚至搜索所需量级精度的周期值. 举例说明, 假设在 0.025—0.045 之间搜索出  $\chi^2$  量最大的是 0.033, 接着就在 0.0320—0.0340 之间搜索, 依次循环搜索, 直至找到所需量级水平的周期.

表 1 不同观测时间得到的周期

观测时长/s	平均流量/ph·s <sup>-1</sup>	周期/s
3000	1100.7	0.03312496997
2500	1094.7	0.03312497021
2000	1087.9	0.03312497254
1500	1080.6	0.03312497545
1000	1073.5	0.03312497922
500	1068.8	0.03312498547

周期初值的范围也是影响  $\chi^2$  量评估方法搜索周期运算速度的一个重要因素, 若搜索周期初值较准确, 只需在较小的范围内进行搜索, 大大减少运算量, 提高了计算速度, 另外  $\chi^2$  量评估方法对初值的准确度特别灵敏, 若初值误差较大可能搜索不出正确的周期值, 该问题可用 Lomb 算法较好地解决.

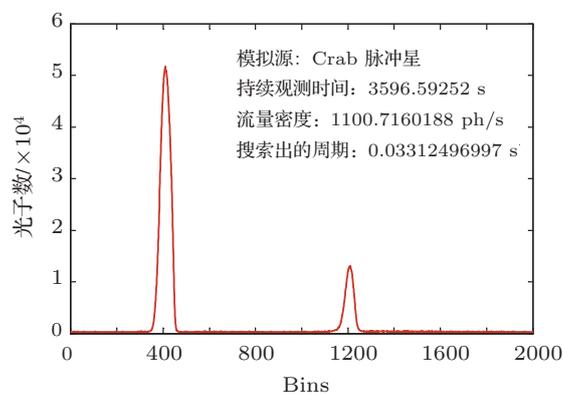


图4 Crab 脉冲星轮廓折叠图

#### 3.2.2 算例二: Lomb 算法

本算例所处理的计时数据大概包括 100000 个光子, 观测时间约 92.189733 s. 在 Lomb 算法中, 需检测的独立最低频率  $f$  为观测文件持续时间  $\max(t_i) - \min(t_i) = T$  的倒数, 这样频率的选择为了使观测计时数据包括在一个完整的周期中. 在 FFT 算法中, 较高的独立频率往往是  $1/T$  的整数倍, 而我们感兴趣的是功率谱图中具有统

计显著性的峰值, 因此希望采样频率最好比  $1/T$  更精细一些, 以便使采样点更接近峰值的顶点. 在算例中, 设置过量采样率为 4, 即独立的最低频率  $f = 1/4T$ , 最高选择的频率通常与 Nyquist 频率  $f_c$  成比例, 若在同样的时间间隔  $T$  内均匀选取  $N$  个数据点, 那么  $f_c = N/(2T)$ . 本算例中, 最低的独立频率  $f = 0.00271326$  Hz, 最高频率为 542.652 Hz, 使用 Lomb 算法得到的功率谱 (归一化周期图) 见图 5.

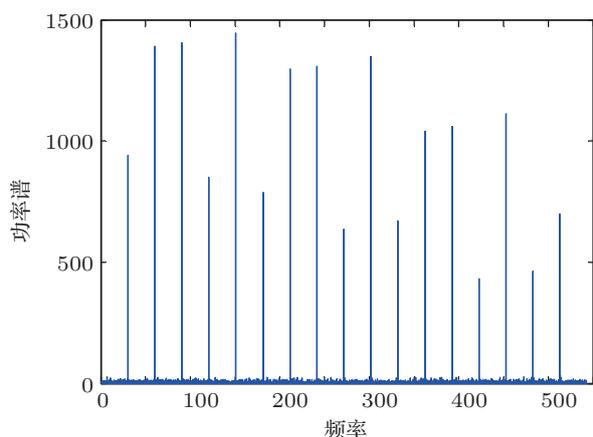


图 5 Lomb 归一化周期图

由图 5 可知, 功率谱图 (归一化周期图) 出现了 17 个具有明显统计性的峰值, 且后面 16 个峰值对应的频率大小是第一峰值的整数倍, 这是由于倍频现象引起的. 第一个峰值对应的频率称为本征频率, 使用频谱方法分析数据时, 功率谱会在本征频率的整数倍处出现峰值. 本征频率  $f = 30.1818$  Hz, 对应的周期  $T = 33.12596479$  ms, 与算例 1 搜索的周期在  $10^{-5}$  s 量级水平是一致的. 根据前面的讨论, 其周期可以作为  $\chi^2$  量评估方法的初值, 进而搜索准确的周期. 使用  $T = 33.12596479$  ms 作为初始周期, 搜索得到的周期值为 33.124969965 ms.

Lomb 算法是一个运行速度很慢的算法, 本算例的计算量至少  $10^{10}$  数量级, 需要运行很长时间 (算例耗时约一天) 才得出上述结果, 不利于实际工程上的应用, 故借鉴 FFT 思路对 Lomb 算法进行改进, 以提高计算速度.

### 3.2.3 算例三: 改进的 Lomb 算法

本算例处理的计时数据大概包括 1000000 个光子, 观测时间约 933.829456 s. 本算例中, 过样采样率也为 4, 最低的独立频率  $f = 0.000267986$  Hz,

最高频率为 535.971 Hz, 使用改进的 Lomb 算法得到的功率谱 (归一化周期图) 见图 6.

由图 6 可知, 功率谱图 (归一化周期图) 同样出现 17 个显著的峰值, 而且后面 16 个峰值对应的频率是第一峰值的整数倍, 也是由于倍频现象引起的. 本征频率  $f = 30.1880$  Hz, 对应的周期  $T = 33.12574532$  ms. 使用此值作为  $\chi^2$  量评估方法的初值, 搜索得到的周期值为 0.0331249699695021 s, 折叠得到脉冲轮廓见图 7.

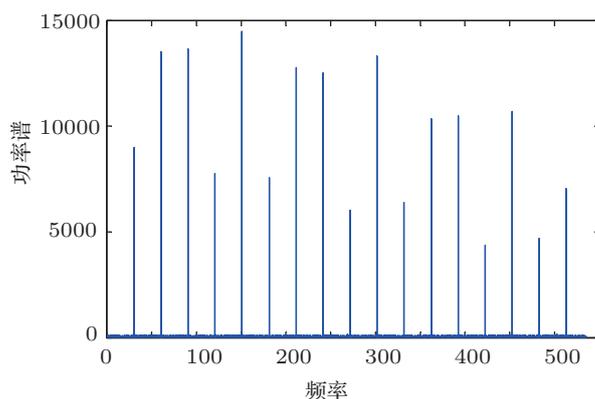


图 6 Lomb 归一化周期图

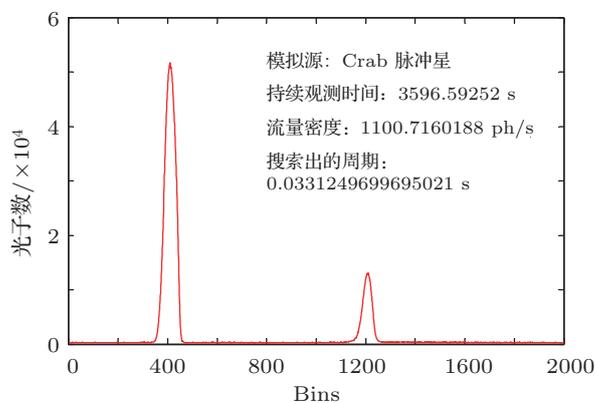


图 7 Crab 脉冲星轮廓折叠图

改进的 Lomb 算法的计算速度较快, 其运算量约  $10^7$  数量级, 其观测数据量是算例二的 10 倍, 而运算量却大幅度减少. 该算法只是对 Lomb 算法进行近似处理, 核心还是 Lomb 算法, 结果并没有发生多大的变化. 由于搜索的频率只有很接近真实频率时才能得到准确的结果, 我们可以扩大过量采样率. 但是要得到很高精度的结果, 将使过量采样数据量非常庞大, 不是一个优选的策略. 故我们首先对部分数据用改进的 Lomb 算法处理, 估计出一个较准确的周期初值, 再应用  $\chi^2$  量评估方法对初值进一

步精化, 得到一个高精度的脉冲星周期.

## 4 讨论与结论

X 射线脉冲星导航属于基础性和前瞻性研究, 涉及天体物理、信号处理、时间测量、控制理论、X 射线探测器等众多学科, 具有重要的理论研究和工程应用价值. 本文主要对非等间隔计时数据的脉冲星周期快速搜索算法进行了分析, 并使用 X 射线源仿真系统对算法进行验证, 搜索出准确的周期并折叠出正确的脉冲星轮廓.

本文的算法使用仿真系统产生的计时数据进行实验, 验证了该算法具有良好的性质, 然而对实测数据的处理与仿真数据存在较大差距, 故需对算法进一步研究和完善.

1) 脉冲星辐射 X 射线光子的流量密度很弱, 只有极个别脉冲星的流量密度能达到  $1 \text{ ph/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  以上. 换句话说, 脉冲星信号非常弱, 其信号可能会淹没于背景噪声中. 本文的算法能否处理弱信噪比的计时数据有待进一步研究, 因此研究适用于对弱信噪比的计时数据处理算法具有实际意义. RXTE 卫星是迄今为止惟一在 X 射线波段探测到 X 射线源微秒量级光变的天文卫星<sup>[16]</sup>, 本文使用 Heasoft 软件对 Crab 脉冲星一段实测数据进行处理, 观测持续时间为 1552.52 s, 共收集到 8488770 个有效 X 射线光子, 使用  $\chi^2$  量评估方法搜索出其周期为 0.0334683 s, 折叠出的脉冲星轮廓如图 8 所示.

Crab 脉冲星辐射的 X 射线光子流量约为  $1.54 \text{ ph/cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 是目前发现 X 辐射最强的一颗脉冲星. 由图 8 可知, 其观测事例数据含有很强的本底噪声, 若脉冲星信号更加微弱, 需要累积轮廓的积分时间

更长, 本底噪声更加强烈. 由图 7 和图 8 可知, X 射线源仿真系统的结果比较理想, 与实测情况有较大差距, 这也是我们下一步改进 X 射线仿真源系统的方向.

2) 计算效率有待进一步提高. 改进的 Lomb 算法可以快速给出较准确的周期初值, 但  $\chi^2$  量评估方法对初值范围很敏感且其运算速度较慢, 制约着计算速度的提高. 所以希望寻找一种新算法能够直接使用频谱方法快速得到准确的周期.

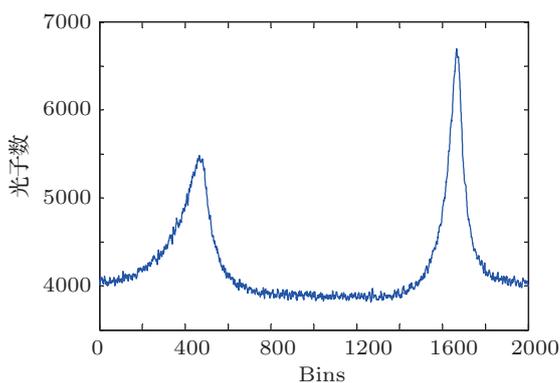


图 8 Crab 脉冲星轮廓折叠图

脉冲星周期搜索是脉冲星导航的一项基础性工作. 在利用脉冲星的计时数据实现导航过程中, 由于脉冲星自转存在长期变慢的特点, 而导航数据库只能提供某历元的脉冲星周期以及周期变化率, 若星载处理器能够及时对计时数据处理得到对应当前时刻的准确脉冲星周期, 可以有效地减少时间模型带来的误差, 提高航天器自主导航的精度. 更为重要的是可以发现脉冲星发生周期跃变现象, 及时向用户发布预警信息, 提高了系统的可用性.

- [1] Sheikh S I, Pines D J 2006 *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **29** 49
- [2] Mao Y 2009 *Ph. D. Dissertation* (Zhengzhou: PLA Information Engineering University) (in Chinese) [毛悦 2009 博士学位论文(郑州: 解放军信息工程大学)]
- [3] Sheikh S I 2005 *Ph. D. Dissertation* (USA: University of Maryland)
- [4] Burns W R, Clark B G 1969 *Astron. Astrophys.* **2** 280
- [5] Ransom S M, Eikenberry S S, Middleditch J 2002 *The Astronomical Journal* **124** 1788
- [6] Ransom S M, Cordes J M, Eikenberry S S 2003 *The Astronomical Journal* **589** 911
- [7] Li J X, Ke X Z, Zhao B S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069701 (in Chinese) [李建勋, 柯熙政, 赵宝升 2012 物理学报 **61** 069701]
- [8] Su Z, Wang Y, Xu L P 2010 *Journal of Astronautics* **31** 1563 (in Chinese) [苏哲, 王勇, 许录平 2010 宇航学报 **31** 1563]
- [9] Hu G S 2009 *Numeric Signal Processing* (Beijing: Tsing University Press) p169 (in Chinese) [胡广书 2009 数字信号处理(北京: 清华大学出版社) p169]
- [10] William H, Press S A, Teukolsky W T, Brlan P F 2007 *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing* (3rd Ed.) (London: Cambridge University Press) p685
- [11] Jian N C, Wang G L, Li J L, Zhang B 2006 *Acta Astr. Sin.* **47** 336 (in Chinese) [简念川, 王广利, 李金岭, 张波 2006 天文学报 **47** 336]
- [12] Andrew L, Francis G S 2005 *Pulsar Astronomy* (2nd Ed.) (London: Cambridge University Press) p24
- [13] Lomb N R 1976 *Astrophysics and Space Science* **39** 447
- [14] Scargle J D 1982 *Astrophysical Journal* **338** 277
- [15] Press W H, Rybicki G B 1989 *Astrophysical Journal* **302** 757

[16] Li Z B 2011 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [李志兵 2011 博士学位论文 (北京: 中国科学院

研究生院)]

# Quick search algorithm of X-ray pulsar period based on unevenly spaced timing data\*

Zhou Qing-Yong<sup>1)2)†</sup> Ji Jian-Feng<sup>1)2)</sup> Ren Hong-Fei<sup>1)2)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China*)

2) (*Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China*)

(Received 10 March 2012; revised manuscript received 13 August 2012)

## Abstract

Timing information of X-ray pulsar signal is of the vital significance for realizing the autonomous navigation of spacecraft in deep space. The accurate timing model (period and period derivation) is the foundation of achieving high-precision auto-navigation solutions. Because the data that the X-ray photons arrive at the detector are unevenly spaced, both  $\chi^2$  evaluation method and Lomb algorithm are analyzed. The idea is brought forward that the initial value of pulsar period is gained using the  $\chi^2$  evaluation method, then the result of period is refined by Lomb algorithm. Meanwhile, the Lomb algorithm is ameliorated by the idea of fast Fourier transform algorithm, the efficiency of operation is enhanced highly. Finally the exact pulsar period is estimated, and correct pulse profile is replicated using the measured timing data from the X-ray source simulation system which used to validate the algorithm.

**Keywords:** pulsar navigation, profile replicate, fast Fourier transform, X-ray source simulation system

**PACS:** 97.60.Gb, 07.85.-m, 07.05.kf

**DOI:** 10.7498/aps.62.019701

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41004013, 41174025, 41204020).

† Corresponding author. E-mail: zjlzqy1986@163.com