

一种脉冲星周期的时域估计新方法*

李建勋^{1)2)†} 柯熙政¹⁾ 赵宝升²⁾

1) (西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048)

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)

(2011年5月8日收到; 2011年7月16日收到修改稿)

脉冲星信号的周期估计在脉冲星搜索、观测以及定时研究中具有重要作用. 在分析脉冲星周期频域识别方法的基础上, 基于脉冲星观测信号的二阶循环平稳模型, 提出了一种周期估计的时域新方法——最大相关方差搜索法. 通过对观测信号按假定周期(可变)分组, 计算分组后不同时刻的相关系数, 进一步得到系数的方差, 然后寻找不同周期下的方差最大值, 即可得到脉冲星的辐射周期估计. 分别对单峰脉冲星 (PSR J0437-4715) 的实测信号、双峰脉冲星 (PSR B1821-24) 的仿真信号以及 ATNF EPN 数据库中的多颗脉冲星数据进行了周期估计, 均得到了令人满意的结果. 对众多脉冲星的计算结果表明, 与傅里叶频谱法相比, 该时域方法对噪声不敏感, 尤其在低信噪比情况下仍表现出较优越的性能; 与双谱相干统计量方法^[6]相比, 运算复杂度更低; 尽管其在处理非连续观测数据时能力不足, 但仍然可为微弱脉冲星的实时周期估计提供有力参考.

关键词: 脉冲星搜索, 周期估计, 循环平稳信号, 时域搜索

PACS: 97.60.Gb, 95.75.Wx, 95.55.Sh

1 引言

自从1967年休伊什和贝尔发现第一颗射电脉冲星以来, 人们对脉冲星的物理特性和应用研究越来越深入. 脉冲星属于高速旋转的致密中子星, 其自转周期非常稳定, 用于计时和导航的潜力巨大^[1]. 当前, 脉冲星研究领域一个重要的任务是开展巡天观测, 为此, 我国正在加紧研制500 m口径射电望远镜FAST^[2], X射线脉冲星观测卫星的研制也已提上日程. 在脉冲星的各项观测中, 到达时刻(TOA)尤为重要, 其含有丰富的天文信息, 如脉冲星的运动轨道、脉冲星质量、内部结构、引力波效应、星际介质特性等^[3,4]. 然而由于射电脉冲星信号到达地面接收机的能量较弱, 测量并估计到达时刻需要先对信号按视周期进行能量累积, 得到高信噪比的平均脉冲轮廓^[5]. 因此, 获取脉冲周期是搜寻或观测未知的、没有任何先验信息的脉冲星的首要任务, 一旦得到周期的近似值, 可进一步通过观测数据进行模型拟合, 估计出更精确的脉

周期以及其他物理参数. 基于此, 本文旨在研究微弱脉冲星信号的周期估计途径.

若不考虑双星系统, 脉冲星搜索的主要过程如图1所示^[6](对于X射线脉冲星, 色散可以忽略), 其中, 核心的周期识别方法一般有时域的快速折叠算法和频域的傅里叶频谱法^[7], 而后者更为常用(见第2节). 然而, 不断研究新的估计方法, 并进行比较综合和优化, 无论是对于天上系统还是地面模拟系统的研制^[8]都有重要意义. 尽管搜寻能流更高的脉冲星以及开发灵敏度更高的X射线探测器也是提高脉冲到达时间测量精度的有效手段, 但寻找更好的弱信号处理算法仍具有普遍意义^[9-12].

为了重点探索核心的周期识别方法, 即对消色散后的时间序列的周期进行估计, 我们首先假设色散量DM已知, 搜索DM的过程和方案参考文献[13], 把同时估计DM和周期两个参数的二维搜索问题简化为一维估计问题. 在文献[6]中, 作者曾提出了一种基于双谱相干统计量的周期估计新方法, 但该方法基于频域的二维谱线搜索, 运算量较

* 国家自然科学基金(批准号: 61004122)、数学天元基金(批准号: 11026051)、陕西省自然科学基金(批准号: 2010JQ8002)、陕西省教育厅项目(批准号: 2010JK724)、江苏省博士集聚计划(批准号: 201062)和西安理工大学高层次人才科研基金(批准号: 105-210919)资助的课题.

† E-mail: Ljx088@xaut.edu.cn

大. 随着现代时间序列分析中循环平稳信号理论的发展^[14,15], 有必要重新关注脉冲星周期的时域估计方法. 本文将基于循环平稳模型 (由于脉冲星稳定的自转特性, 其辐射信号的统计特征应该周期变化, 可认为是二阶循环平稳随机过程, 文献 [6] 中已对其合理性进行了验证), 研究一种新的时域估计算法, 旨在为脉冲星的观测处理提供新选择, 方便时域和频域方法的综合, 丰富脉冲星搜索策略. 文中我们假设观测是在相对较短的连续时间内进行, 则周期变化率参数可以忽略; 另外只考虑单峰和双峰两种脉冲类型, 不考虑巨脉冲和零脉冲存在的情况.

2 基于傅里叶变换的脉冲星周期估计

信号的幅度谱或功率谱可以用来检测周期信号的存在. 设消色散后的时间序列为 X_j , 长度为 N ,

经离散傅里叶变换 (DFT) 后的第 k 个分量为 H_k .

1) 首先, 通常在相邻的两个频率点之间进行简单的傅里叶插值以减少半整数频率点处的功率损失:

$$H_{k+\frac{1}{2}} \approx \frac{\pi}{4}(H_k - H_{k+1}).$$

2) 实际观测中, 发现脉冲星频谱中经常含有明显的低频噪声 (红噪声), 因此需要先进行白化, 然后对幅度谱进行归一化, 以便估计周期性信号的显著性水平和信噪比.

3) 由于脉冲星的周期辐射脉冲具有一定脉宽, 因此其频谱具有一系列的谐波成分. 为了充分利用这一特点, 人们采用非相干谐波累加法^[16]来提高频谱的信噪比 (如图 2 所示), 即把功率谱 (或幅度谱) 扩展两倍后与原谱相加, 当然这一过程可被反复进行.

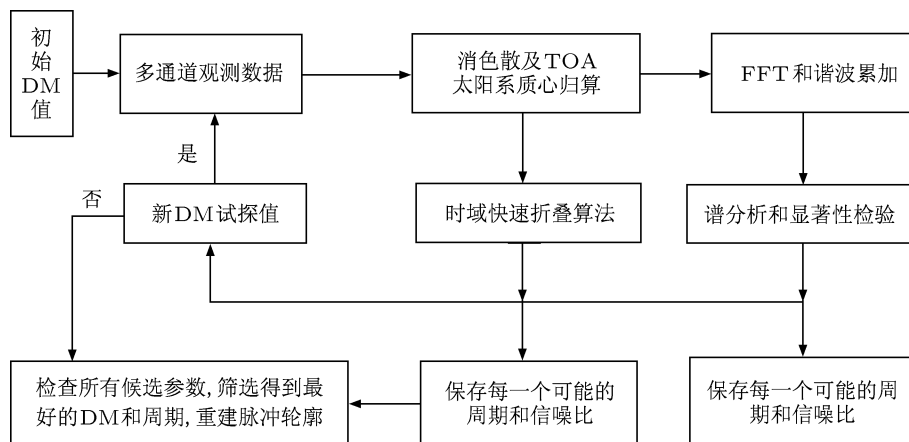


图 1 脉冲星搜索的主要步骤

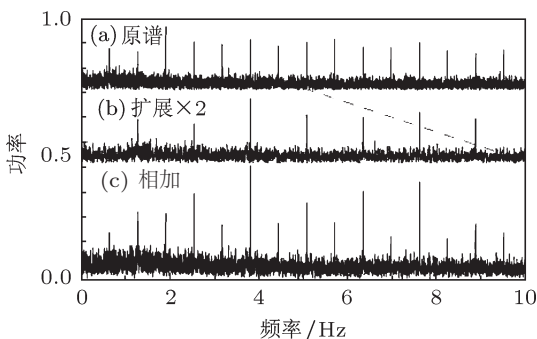


图 2 谐波累加过程示意^[16]

4) 对于任一个 DM 试探值得到的时间序列, 将其频域上 (包括谐波累积处理) 估计的信噪比与阈值进行判别, 就得到一系列可能的候选周期. 然后分析信噪比的大小以及相同候选周期出现的次数,

那些具有最大信噪比或 (以及) 出现次数较多的候选周期所对应的 DM 则可作为 DM 真值的近似, 最后以选定的 DM 和周期估计值进行原始观测信号的消色散和折叠累加, 得到脉冲信号.

结合图 1, 我们可以看到周期搜索是一个工程性很强的工作, 有时需要人工的反复分析和检验.

3 周期估计的最大相关方差搜索法

对于平稳随机信号, 可以用基于傅里叶变换的周期图法来确定周期, 对于循环平稳随机过程, 若周期的先验信息未知, 其循环周期可通过一些统计估计器如循环周期图获得, 但循环泄露现象的存在使得这类方法的估计性能变差^[17]. 本文将提出一

种最大相关方差搜索法, 其对平稳噪声不敏感, 也适用于某些病态^[18]的循环平稳随机过程.

对于具有循环周期 p 的 $\{x(t)\}_{t=0}^{N-1}$, 它的 $R_{xx}(t; \tau)$ 的估计量为

$$\hat{R}_{xx}(t; \tau) = \frac{1}{\lfloor N/p \rfloor} \sum_{k=0}^{\lfloor (N-\tau)/p \rfloor - 1} x(kp+t) \times x(kp+t+\tau), \quad (1)$$

其中, $0 \leq t \leq p-1, 0 \leq \tau \leq N-p, \tau$ 为时延量, N 为序列长度, k 为与循环周期 p 有关的分组变量, $0 \leq k \leq \lfloor (N-\tau)/p \rfloor - 1$.

现假设循环周期未知, 设周期的搜索变量为 n , 定义如下映射或操作:

$$\underline{x}_n = L_n x = \begin{bmatrix} x_n^{(0)} \\ x_n^{(1)} \\ \vdots \\ x_n^{(n-1)} \end{bmatrix} = \left\{ \begin{array}{l} x(0), x(n), x(2n), \dots \\ x(1), x(n+1), x(2n+1), \dots \\ \vdots \\ x(n-1), x(2n-1), x(3n-1), \dots \end{array} \right\}, \quad (2)$$

其中, 第 k 个分组向量为

$$x_n^{(k)} = \{x(k), x(n+k), x(2n+k), \dots, x(\lfloor N/n \rfloor n + k)\} \\ k=0, 1, \dots, n-1. \quad (3)$$

相应的相关统计量可以定义为

$$R_{x_n^{(k_1)} x_n^{(k_2)}} = \frac{1}{\lfloor N/n \rfloor} \sum_{r=0}^{\lfloor N/n \rfloor - \tau - 1} x(rn+k_1) \times x(rn+k_2+\tau n), \quad (4)$$

其中 $0 \leq \tau \leq \lfloor N/n \rfloor - 1, 0 \leq k_1 \leq n-1, k_1 \leq k_2, r$ 为与搜索变量 n 有关的分组变量.

给定一个固定的 n 和 $\{x(t)\}_{t=0}^{N-1}$, 此估计量与 $\hat{R}_{xx}(t; \tau)$ 存在如下关系:

$$\hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}(0) \cong \frac{1}{p} \sum_{r=0}^{\bar{p}-1} \hat{R}_{xx}(rn+k; \tau), \quad (5)$$

其中 $\bar{p} = p/\text{gcd}(p, n)$, gcd 指最大公约数, $0 \leq k \leq n-1$.

由 (5) 式可知, 如果 p 和 n 是互质的, $\hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}(0)$ 不随 k 的变化而变化, 即方差为零或很小, 与序列 $\{\hat{R}_{xx}(t; \tau)\}_{k=0}^{p-1}$ 的均值相等.

若 $n = lp (l \in \mathbb{Z}_+)$, 有

$$\hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}(0) = \hat{R}_{xx}(k; \tau). \quad (6)$$

而对循环平稳周期信号来说, 通常 $R_{xx}(t; \tau)$ 时变相关, 对于不同的整数 k 取值不一样. 即序列 $\{\hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}(0)\}_{k=0}^{n-1}$ 的样本方差

$$\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \left(\hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}(0) - \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}(0) \right)^2 \quad (7)$$

比较大.

进一步, 对于相关病态的平稳随机过程, 即 $R_{xx}(t; \tau)$ 满足

$$R_{xx}(0; \tau) = R_{xx}(1; \tau) = \dots = R_{xx}(p-1; \tau). \quad (8)$$

仍可证明其在 $n = lp$ 下的样本方差大于在 $n \neq lp$ 时的方差^[15](不失一般性, 设 $\{\hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}(0)\}_{k=0}^{n-1}$ 的均值为 0):

$$\frac{1}{p} \sum_{t=0}^{p-1} \hat{R}_{xx}^2(t; \tau) - \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}^2(0) \\ = \frac{1}{p} \sum_{t=0}^{p-1} \hat{R}_{xx}^2(t; \tau) - \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \left[\frac{1}{\bar{p}} \sum_{r=0}^{\bar{p}-1} \hat{R}_{xx}(rn+k; \tau) \right]^2 \\ = \frac{1}{np^2} \sum_{k=0}^{n-1} \left\{ \bar{p} \sum_{r=0}^{\bar{p}-1} \hat{R}_{xx}^2(rn+k; \tau) - \left[\sum_{r=0}^{\bar{p}-1} \hat{R}_{xx}(rn+k; \tau) \right]^2 \right\} > 0. \quad (9)$$

综上, 给定一个信号 $\{x(t)\}_{t=0}^{N-1}$, 最大相关方差搜索法的估计步骤如下.

1) 搜索变量 n 从 2 开始. 假设信号是时变相关的, 选择一个整数延迟 τ (通常为 0 或 1).

2) 用公式 (4) 计算出 $\hat{R}_{x_n^{(k)} x_n^{(k+\tau)}}(0) (k = 1, 2, \dots, n)$, 并用 (7) 式计算它的样本方差.

3) 重复第一和第二步, 通过不断的增加 n , 直到某一个合理的 n_{\max} , 其中 $n_{\max} \geq lp, l$ 是正整数.

4) 以 n 为横坐标绘出样本方差变化曲线, 其中它的最大峰值点就表明了信号在 $n = lp$ 点处具有周期性. 在一串最大峰值中, 最小的整数 p 就是估计周期.

4 实验和性能分析

首先我们用本文方法来处理单脉冲特征的脉冲星信号. 选择 PSR J0437-4715, 它是以一颗低密度白矮星为伴星的毫秒脉冲星, 双星轨道周期为 5.74

天, 其脉冲辐射的周期约为 5.757 ms, 其他主要物理参数参考文献 [19]. 数据通过澳大利亚 Parks 射电观测站的 512 通道接收机观测得到, 接收机总带宽为 256 MHz, 第一通道的中心观测频率为 1517.75

Hz, 采样间隔约为 0.08 ms, 则一个周期的采样点数为 72 个. 分别处理三段信噪比不同的消色散后的观测信号 (如图 3(a1), (a2), (a3) 所示), 考察其在确定脉冲星辐射周期这一重要参数时的性能.

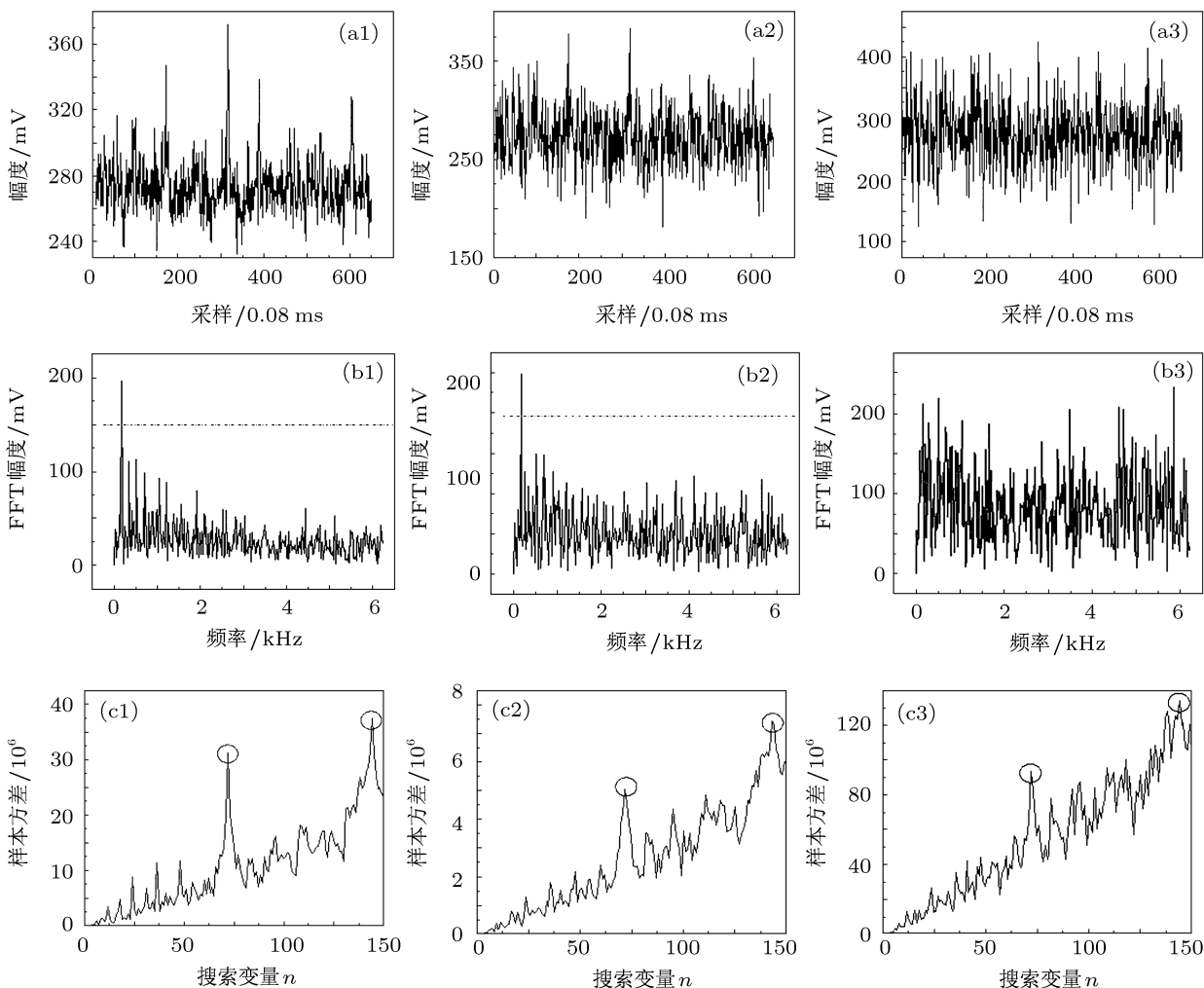


图 3 三种信噪比下的周期估计结果对比

观测数据仅包含 648 个采样点, 对数据进行去直流分量处理后, 信噪比分别约为 5 dB, -10 dB 和 -30 dB. 图 3 (b1), (b2), (b3) 为基于快速傅里叶变换 (FFT) 的频域算法的频率 (周期) 估计结果, (c1), (c2), (c3) 为最大相关方差搜索法的周期估计结果. 基于双谱相干统计量的估计结果参见文献 [5]. 可以看到, 频谱估计法在前两种信噪比下可通过设定阈值实现正确的估计 (如图 3 中虚线所示), 检测得到信号频率为 0.1733 kHz, 周期为 5.7703 ms, 估计误差主要由离散傅里叶变换的栅栏效应引起. 但信噪比为 -30 dB 时, FFT 频谱法已无法实现频率识别了. 而本文所提的方法在三种情况下都能够得到

正确的估计 (峰值出现在 $n = 72l$, 如图中的圆圈所示, 第一个峰值的位置为 72, 第二个峰值的位置为 144). 不过随着信噪比的降低, 其估计性能也逐步下降.

表 1 为三种方法的计算时间 (信噪比为 -30 dB 时). 从表中可以看出, 基于 FFT 的频域算法的耗时最短, 本文方法的耗时低于基于双谱相干统计量的估计算法.

表 1 三种方法的运算复杂度 (单位: s)

傅里叶频谱法	双谱统计量法	本文方法
0.2511	1.2662	1.1246

下面我们来处理具有双峰特征的脉冲星信号. 以脉冲星 PSR B1821-24 为原型, 其周期为 3.05 ms (自转频率为 327.87 Hz), 信号较弱. 为了控制信噪比, 我们利用 B1821-24 的解析轮廓仿真产生观测数据, 采用两个高斯函数的叠加构造模型:

$$h(t) = l_1 \exp \left[-\frac{(t - t_1)^2}{2\omega_1^2} \right] + l_2 \exp \left[-\frac{(t - t_2)^2}{2\omega_2^2} \right], \quad (10)$$

其中, 拟合参数如表 2 所示 [20].

令采样时间为 1×10^{-5} s, 模拟产生如图 4(a) 所示的含噪信号, 则一个周期的采样点为 305 个. 图 4(b) 为该数据经 FFT 变换后的各谐波分量, 横坐标采用对数坐标以提高较低频率处的显示分辨率. 可以看到, 在 327 Hz 附近并没有出现峰值明显的基波分量, 采用阈值估计可能会出现不确定性, 而最大相关方差搜索法却可以简单有效地得到周期估计 (如图 4(c) 所示, 两个峰值出现在 $n = 305l$ 处),

表明该方法同样适用于具有双脉冲辐射特征的脉冲星的自转周期估计.

表 2 脉冲轮廓参数

l_1	w_1	t_1
2.3278	8.3404×10^{-4}	8.3404×10^{-4}
l_2	w_2	t_2
5.6764	3.7475×10^{-5}	2.2128×10^{-3}

我们又从 ATNF EPN 脉冲星数据库分别选取了 10 多颗单峰和双峰脉冲星的观测数据 [21], 每组数据由多个周期的脉冲轮廓组成, 并叠加上较强的高斯白噪声以验证估计性能. 结果表明, 该算法均得到了不错的估计效果 (文中只列出 PSR B1913+16 的估计结果, 其周期为 59.03 ms, 如图 5 所示). 其中图 5(a) 为脉冲轮廓, 一个周期的采样点数为 121 个, 图 5(b) 为被噪声淹没的观测信号, 图 5(c) 为用本方法处理的结果.

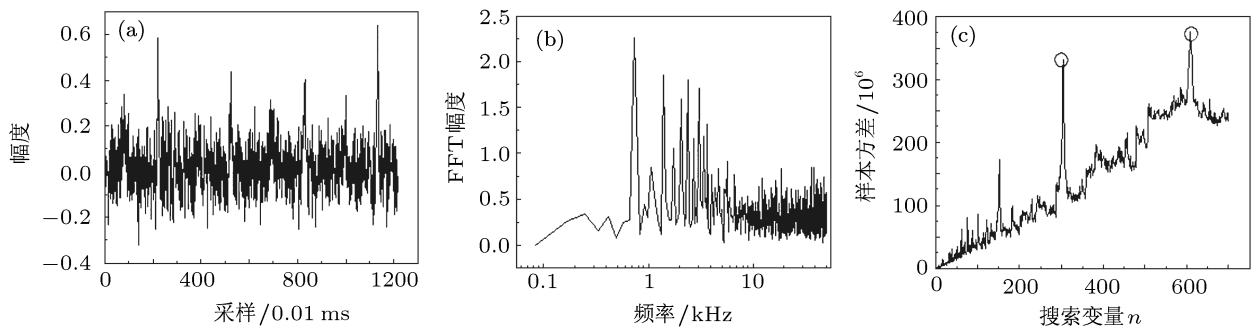


图 4 双峰脉冲星的周期估计结果

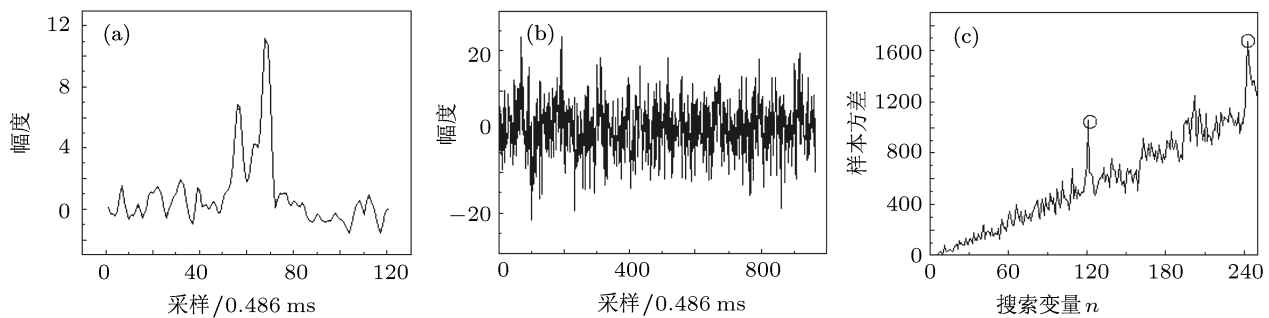


图 5 双峰脉冲星 B1913+16 的周期估计结果

为了综合考察该算法的性能, 我们还对图 3(a1) 中的数据进行了如下处理: 在数据块的中间插入了 150 个连续的数据 0, 用以模拟此时间段没有观测数据的情况 (如图 6(a)). 结果发现对于非连续观测数据, 傅里叶变换法可进行正确的频率估计 (如图 6(b)), 而对于本文方法得到的结果, 本应该在预

期位置出现的脉峰却被噪声“淹没”了 (如图 6(c)), 说明其只能应用于处理连续观测数据, 需要进一步寻找其改进算法. 考虑到该方法对数据量要求并不高 (图 3 只用了 10 个周期的数据), 因此在实际观测中, 只需选择一段短时间的连续观测数据, 相对于高信噪比需求, 这个要求较容易实现.

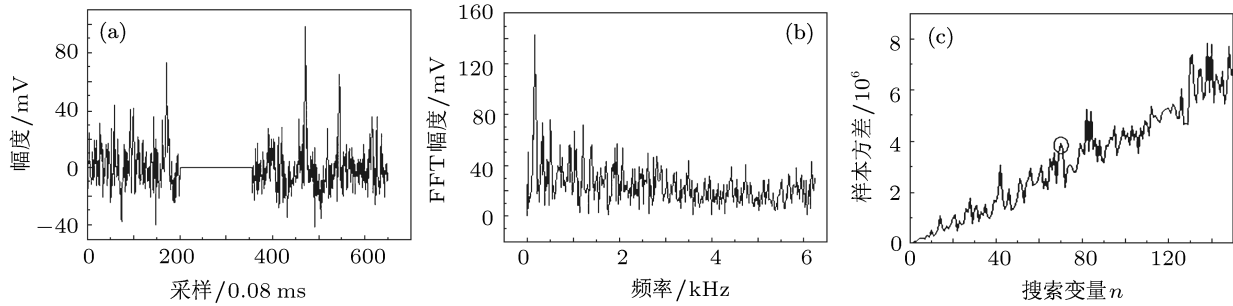


图6 非连续观测数据下的周期估计结果对比

5 结论

无论是观测射电脉冲星还是 X 射线脉冲星, 对信号周期的正确估计是必然需求. 对于循环平稳模型下的众多周期估计方法多基于相干函数统计量, 可以给出信号的二维周期图, 但运算复杂度大, 而且在噪声较强时也效果不佳. 经典的 FFT 法虽然计算速度较快, 但在低信噪比下需要进行多次的谐波累加操作, 而本文提出的方法是通过对观测数据进行简单的分组变换, 利用相关运算和一维空间的最大值搜索来寻找周期, 计算步骤相对简便.

结果表明, 该方法至少在处理单峰和双峰脉冲星的连续观测数据时效果明显, 即使在信噪比低于 -30 dB 时仍然可以得到循环周期, 且具有运算复杂度小、对数据量要求不高的优点. 本研究不仅对微弱甚至极弱脉冲星信号的实时周期估计具有参考价值, 也适用于事后对海量的脉冲星观测数据进行分析和处理.

对国家天文台举办的 2009 年脉冲星学习班以及 2010 年脉冲星研究进展研讨会上众多专家在脉冲星搜索问题上给予的指导表示感谢.

- [1] Li J X, Ke X Z 2009 *Sci. China G: Phys. Mech. Astron.* **52** 303
- [2] Nan R D 2006 *Sci. China G: Phys. Mech. Astron.* **49** 129
- [3] Belczynski K, Kalogera V M, Bulik T 2002 *Astrophys. J.* **572** 407
- [4] Stairs I H 2006 *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **32** 259
- [5] Kramer M, Xilouris K M, Fernando C 1999 *Astrophys. J.* **520** 324
- [6] Li J X, Ke X Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8305 (in Chinese) [李建勋, 柯熙政 2010 物理学报 **59** 8305]
- [7] Lyne A G, Smith F G 1998 *Pulsar Astronomy* (Cambridge: Cambridge University Press) p106
- [8] Hu H J, Zhao B S, Sheng L Z, Yan Q R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 857 (in Chinese) [胡慧君, 赵宝升, 盛立志, 鄢秋荣 2011 物理学报 **60** 857]
- [9] Zhong C X, Yang T G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6157 (in Chinese) [仲崇霞, 杨廷高 2007 物理学报 **56** 6157]
- [10] 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]
- [11] Zhang H, Xu L P, Xie Q, Luo N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 822 (in Chinese) [张华, 许录平, 谢强, 罗楠 2011 物理学报 **60** 822]
- [12] Zhang H, Xu L P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 816 (in Chinese) [张华, 许录平 2011 物理学报 **60** 816]
- [13] Lorimer D R, Kramer M 2005 *Handbook of Pulsar Astronomy* (Cambridge: Cambridge University Press) p127
- [14] Giannakis G B 1999 *Digital Signal Processing Handbook* (Boca Raton: CRC Press LLC) p168
- [15] Wang J D, Chen T W, Huang B 2006 *IEEE Trans. Signal Proces.* **54** 83
- [16] Lorimer D R 1998 arXiv: 9801091 [astro-ph]
- [17] Hurd H L, Gerr N L 1991 *J. Times Ser. Anal.* **12** 337
- [18] Lii K S, Rosenblatt M 2006 *Ann. Stat.* **34** 1115
- [19] Van Straten W 2003 *Ph.D. dissertation* (Swinburne University of Technology)
- [20] Hanson J E, Sheikh S I, Graven P H *the 2008 IEEE-ION_PLANS Symposium* Monterey, USA May 5-8, 2008 p704
- [21] <http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

A new time-domain estimation method for period of pulsars*

Li Jian-Xun^{1)2)†} Ke Xi-Zheng¹⁾ Zhao Bao-Sheng²⁾

1) (*Automation and Information Engineering School, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

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

(Received 8 May 2011; revised manuscript received 16 July 2011)

Abstract

The estimation of pulsar period is important for pulsar searching, observation and timing. In this paper, the frequency-domain method which is popular in periodicity searches is analyzed, and further more, a novel method in time-domain is proposed to estimate the cyclo-period of pulsars based on the second-order cyclo-stationary model of the radiation signal. Firstly, the discrete-time observing signal is blocked by assumed period which is alterable. Then, the correlation estimations and their sample variances are computed each as a function of blocking operator index, where the largest peaks display a periodic pattern, from which the cyclo-period can be obtained. Using this method, the period of PSR J0437-4715 with single pulse is estimated well based on original signal, and the period of PSR B1821-24 with double pulses is also estimated based on the simulated signal. The same work is done for the observed data from ATNF EPN pulsar database. The simulation results and the experimental results for many pulsars show that compared with the classical Fourier-transform method, this algorithm is non-sensitive to the noise, and it is effective even though in the case of low signal-to-noise ratio. And it is of low computation complexity compared with the bispectrum coherence method. This method possesses higher popularization value in real-time observation and processing for weak pulsar signal, though it does not work well in dealing with noncontinuous observing data.

Keywords: pulsar searching, period estimation, cyclostationary signal, time-domain estimation

PACS: 97.60.Gb, 95.75.Wx, 95.55.Sh

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61004122), the Tian Yuan Special Foundation (Grant No. 11026051), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JQ8002), the Scientific Research Fund of Education Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JK724), Doctor-aggregating Project of Jiangsu Province, China (Grant Nos. 201062) and the Science Foundation for Specialists With High Education Level of Xi'an University of Technology, China (Grant No. 105-210919).

† E-mail: Ljx088@xaut.edu.cn