

doi:10.3788/gzxb20144312.1204001

基于小波 Fisz 变换的 X 射线脉冲星信号降噪研究

刘秀平¹, 景军锋¹, 孙海峰², 韩丽丽³

(1 西安工程大学 电子信息学院, 西安 710048)

(2 西安电子科技大学 空间科学与技术学院, 西安 710071)

(3 西安交通工程学院, 西安 710065)

摘 要:针对 X 射线脉冲星信号信噪比低, 难以获取精确脉冲星信号相位的问题, 提出了基于 Wavelet-Fisz 变换的 X 射线脉冲星信号的估计方法. 根据 X 射线脉冲星信号特性建立了信号模型, 推导了 Wavelet-Fisz 变换理论, 利用该变换将 X 射线脉冲星信号逼近于高斯分布, 对变换后的信号数据进行估计. 对大量 RXTE 的实测数据进行分析, 结果表明在 Wavelet-Fisz 变换下能获得较好的估计性能, 且耗时小, 有利于 X 射线脉冲星导航的工程应用.

关键词:光子序列; 降噪; Wavelet-Fisz 变换; X 射线脉冲星信号; 方差稳定变换

中图分类号: TP911.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1204001-6

De-noising of X-ray Pulsar Signal Based on Wavelet-Fisz Transformation

LIU Xiu-ping¹, JING Jun-feng¹, SUN Hai-feng², HAN Li-li³

(1 *Electronics and Information College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China*)

(2 *School of Aerospace Science and Technoloy, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

(3 *Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710065, China*)

Abstract: As the phase of X-ray pulsar signal is hard to obtain accurately because of low signal noise ratio, a method of estimation based on Wavelet-Fisz transformation for X-ray pulsar signal was proposed. The signal of X-ray pulsars were folded by an enormous number of photon events. The signal model of X-ray pulsar was constructed. The Wavelet-Fisz transformation was derived. The signal of X-ray pulsars were preprocessed to Gaussian distribution by Wavelet-Fisz transformation, then the approximated signal was estimated. Several observation data of RXTE were analyzed, the results show the proposed method has a good performance of estimation, with low overhead of time under Wavelet-Fisz transformation, and is suitable for engineering application of X-ray pulsar navigation.

Key words: Photon sequence; Noise reduction; Wavelet-Fisz transformation; X-ray pulsar signal; VST

OCIS Codes: 040.7480; 250.0040; 120.1880; 070.0070; 340.0340

0 引言

全球导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 和深空网络 (Deep Space Network, DSN) 都依赖于大量地面通信装置, 不利于飞行器的自主实时导航. 脉冲星是周期性旋转且辐射多种频段电磁波的星体, 近年来, 基于 X 射线脉冲星的导航成为研究热点^[1]. X 射线脉冲星信号的降噪和估计是 X 射线脉冲星自主导航的前提.

X 射线脉冲星的原始信号由一系列光子到达探测器的时间序列组成. 光子到达时间 (Time of Arrival, TOA) 是 X 射线脉冲星导航的基本观测量^[2], 经过 TOA 时间尺度转换后, 光子事件叠加形成脉冲轮廓. 探测 X 射线光子是计数过程, 服从泊松 (Poisson) 过程, 其噪音建模服从 Poisson 模型. Poisson 噪音不同于加性的高斯噪音^[3], 其不具有同方差性, 难以直接利用适合于高斯噪音的算法对 Poisson 噪音降噪. 一般采用“漂白”Poisson 噪音的方法, 即将 Poisson 噪音预处理

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61301276) 和西安工程大学博士启动基金 (No. BS1412) 资助

第一作者: 刘秀平 (1981—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为 X 射线脉冲星信号处理、空间信息网络及导航技术. Email: liuxiuping8@126.com

收稿日期: 2014-04-21; **录用日期:** 2014-08-07

<http://www.photon.ac.cn>

为高斯噪声后,再利用高斯降噪.常用的“漂白”方法有 Anscombe 变换^[4]和 Fisz 变换^[5].文献[6]利用小波研究了脉冲星的降噪方法,选择合理的阈值策略,滤除脉冲星信号中的噪声.理论上,确定小波系数的统计分布,在相应分布下确定出不同的阈值,则能获得较好的信号,但算法的开销较大,不利于资源受限的空间飞行器. Bayesian 多尺度模型对脉冲星信号的估计有较好的性能^[7],但并不适合于信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)很低的信号. Fisz 变换不仅可有效逼近高斯分布,而且可与不同小波基结合得到了较好的效果^[8-9].在评价算法性能时,数据来源主要有仿真模拟数据^[10]和实测数据.文献[11]对通过地面模拟装置产生的 X 射线脉冲星数据进行了大量研究,验证了 X 射线脉冲星的辐射机制.事实上,仿真模拟数据难以客观地反映宇宙空间环境的复杂性,需要通过对实测数据的分析,寻求兼顾计算复杂度和估计性能的解决方法.本文基于 Wavelet-Fisz 变换对 X 射线脉冲星信号估计,通过大量实测数据验证了算法的可行性,并研究了该变换与其它降噪算法相结合的估计性能.

1 X 射线脉冲星信号模型

X 射线脉冲信号是非齐次 Poisson 过程,估计强度函数是信号处理的核心问题.建立 X 射线脉冲星的光子到达时刻序列数学模型.

假设在观测时间 (T_b, T_e) 内,探测到 X 射线脉冲星 TOA 的序列为

$$T_b \leq t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_m \leq T_e \quad (1)$$

式中, $t_i, i \in Z$ 为第 i 个光子到达的时刻,是一随机变量.假设 v_0, v_1, \dots, v_{n-1} 为相应间隔内光子到达事件的累积和,则 v_i 服从参量为 $\lambda(t)$ 的非齐次泊松过程,且 $\lambda(t) > 0$ 为光子强度.

将任意观测时间等间隔划分为 n 个 bin 块,即 $I_i \equiv (\frac{i}{n}(T_e - T_b), \frac{i+1}{n}(T_e - T_b))$.任意 I_i 期间,光子到达数量 $v_i = k$ 服从参量为 Λ_i 的 Poisson 分布,即

$$P(v_i = k) = \frac{(\Lambda_i)^k \exp(-\Lambda_i)}{k!} \quad (2)$$

式中, $\Lambda_i = \int_{I_i} \lambda(t) dt$ 为泊松过程的累积率.可见, v_i 是来自参量为 Λ_i 的泊松分布的值, X 射线脉冲信号估计的关键是估计参量 $\Lambda_0, \Lambda_1, \dots, \Lambda_{n-1}$.

2 基于 Wavelet-Fisz 变换的降噪模型

假设 X 射线光子计数为 $\mathbf{v} = (v_0, v_1, \dots, v_{N-1})$, 其对应变换为 $\mathbf{u} = (u_0, u_1, \dots, u_{N-1})$, F_w 为 Wavelet-Fisz 变换的操作因子,则 Wavelet 变换表示为

$$\mathbf{u} = F_w \mathbf{v}$$

式中, F_w 是一种非线性运算.基于 Wavelet-Fisz 变换

的 X 射线脉冲星信号估计算法为:

Step 1: 对观测的 X 射线脉冲星信号 \mathbf{v} 做 Wavelet-Fisz 变换 $\mathbf{u} = F_w \mathbf{v}$, 经过变换后,具有 Poisson 特性的 X 射线脉冲信号具有方差稳定的特性.

Step 2: 对 \mathbf{u} 做降噪处理 $D(\mathbf{u}) = D(F_w \mathbf{v})$, 得到信号的逼近部分 $F_w \mathbf{\Lambda}$. D 为适合于高斯特性的降噪操作.

Step 3: 对 $F_w \mathbf{\Lambda}$ 做 Wavelet-Fisz 逆变换,即 $F^{-1}(F_w \mathbf{\Lambda})$, 得到估计的强度.

利用非标准化滤波器 $\{1/2, -1/2\}$ 和 $\{1/2, -1/2\}$, 将信号 \mathbf{v} 分解为逼近部分 $a_n = (v_{2n} + v_{2n-1})/2$ 和细节部分 $d_n = (v_{2n} - v_{2n-1})/2$, 其中, $n = 0, 1, \dots, N/2 - 1$.

$$\text{当 } f_n = \begin{cases} 0 & a_n = 0 \\ d_n / \sqrt{a_n} & \text{otherwise} \end{cases}, \text{ 则有}$$

$$Z_n = \begin{cases} 0 & V_{2n} = V_{2n+1} = 0 \\ (V_{2n} - V_{2n+1}) / (\sqrt{2} \sqrt{V_{2n} + V_{2n+1}}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_k 是 V_k 的实现值.当 $(v_0, v_1, \dots, v_{N-1})$ 独立时, $\Lambda_{2n}, \Lambda_{2n+1} \rightarrow (\infty, \infty)$ 和 $\Lambda_{2n} / \Lambda_{2n+1} \rightarrow 1$, 则有 $Z_n \rightarrow N(0, 1/2)$. 因此,细节部分的系数替代为 $d_n = f_n$, 使得原信号的噪声逼近于高斯噪声 $N(0, 1/2)$, 噪声部分仍存在于变换后的细节部分中.经过变换后的细节部分更接近高斯噪声,逼近部分则保持不变.可见,只有 Wavelet-Fisz 变换后的噪声部分尽最大程度的逼近于高斯噪声,才能保证 X 射线脉冲星信号降噪和估计性能.

假设小波函数 $\varphi^{j,k}$ 和尺度函数 $\phi^{j,k}$, $j = 0, 1, \dots, J-1$, $k = l2^{J-j}$, $l = 0, 1, \dots, j$, $\varphi_n^{j,k}, \phi_n^{j,k}$ 表示为

$$\varphi_n^{j,k} = \begin{cases} 0, & n < k \\ 1, & k \leq n < k + 2^{J-j-1} \\ -1, & k + 2^{J-j-1} \leq n < k + 2^{J-j} \\ 0, & k + 2^{J-j} \leq n \end{cases} \quad (4)$$

$$\phi_n^{j,k} = \begin{cases} 0, & n < k \\ 1, & k \leq n < k + 2^{J-j} \\ 0, & k + 2^{J-j} \leq n \end{cases} \quad (5)$$

假定 $\epsilon_j(n) = (\epsilon_j^0(n), \epsilon_j^1(n), \dots, \epsilon_j^{j-1}(n))$ 为 n 的二进制表示形式,则相应的 Wavelet-Fisz 变换 $\mathbf{u} = F_w \mathbf{v}$ 为

$$u_n = \frac{\langle \varphi^{0,0}, \mathbf{v} \rangle}{N} + \sum_{j=0}^{J-1} (-1)^{\epsilon_j^1(n)} 2^{-j} c_{j,j,n}(\mathbf{v}) \quad (6)$$

其中

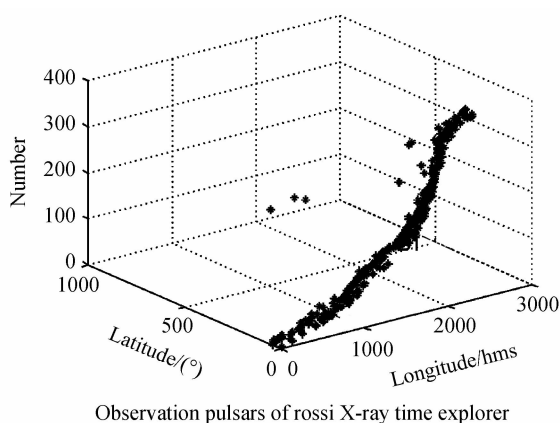
$$c_{j,j,n}(\mathbf{v}) = \begin{cases} \frac{\langle \psi^{j, |n/2^{j-1}| 2^{J-j}}, \mathbf{v} \rangle}{\sqrt{\langle \varphi^{j, |n/2^{j-1}| 2^{J-j}}, \mathbf{v} \rangle}}, & \langle \varphi^{j, |n/2^{j-1}| 2^{J-j}}, \mathbf{v} \rangle > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

在 Wavelet-Fisz 变换下,当 $\lambda \rightarrow \infty$ 和 $\lambda/N \rightarrow 0$, 有 $\text{cor}(U_m, U_n) \rightarrow 0$, 说明变换后的系数间逼近不相关.当 $\lambda/N \rightarrow 0$ 时, $\langle \varphi_{0,0}, \mathbf{v} \rangle / N \rightarrow 0$; 当 $\lambda/N \rightarrow (\infty, \infty)$ 时, $\sum_{j=0}^{J-1} (-1)^{\epsilon_j^1(n)} 2^{(j-J)/2} c_{j,j,n}(\mathbf{v}) \rightarrow N(0, 1)$. 显然, Wavelet-Fisz 变换后的信号为高斯噪声可利用适合于高斯噪声

的降噪方法.

3 算法结果与分析

评价基于 Wavelet-Fisz 算法的 X 射线脉冲星信号估计性能,需要获取大量的 X 射线脉冲星数据来支持.美国航空航天局 NASA 发射 RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer)探测器对不同赤纬、不同赤经的近 400 个 X 射线脉冲星进行了观测(图 1),而且提供了不同观测时间、观测间隔的数据(图 2).这些原始观测数据对研究 X 射线脉冲星信号极具科研价值.可用作导航的 X 射线脉冲星必须流量高且周期短,被认可的约 20 颗左右^[12].本文选取流量较大的 X 射线脉冲星的观测数据来评价算法的估计性能,如 PSR B0531+21 和 PSR B1509-58,其流量为 1.54 和 $1.62 \times 10^{-2} \text{ ph} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. RXTE 卫星上的正比计数阵列 (Proportional Counter Array, PCA)探测器的时间分辨率高达 $1 \mu\text{s}$,能获取较高准确度的 TOA.通过 NASA



Observation pulsars of rossi X-ray time explorer

图 1 X 射线脉冲星分布

Fig. 1 Plot of the X-ray pulsars in Galactic longitude and latitude

表 1 PSR B1509-58 和 PSR B0531+21 的 4 组观测数据

Table 1 The 4 observation data for PSR B1509-58 and PSR B0531+21

	Observation ID	Start time	Efficient time/s	Sum of photons	Events/($\times 10^4$)
1	10402-01-01-00	961002 14:55:28	32 218	14 563 655	10
2	94803-01-11-02	091024 20:31:28	25 918	2 003 870	10
3	96802-01-20-00	111120 19:07:04	1106	10 018 712	10
4	96803-01-12-00	111121 23:44:32	3726	202 575	10

3.1 “高斯化”的性能评价

Anscombe 变换与 Wavelet-Fisz 变换都能将 Poisson 信号转换为“近似高斯”信号. Donoho 提出了 Anscombe 变换,其方差稳定性变换^[13]为

$$Au = 2 \sqrt{v+3/8} \quad (7)$$

实验数据选取了 PSR B1509-58 脉冲星信号,以 96803-01-12-00 为例(图 3).

分位数-分位数 (Quantile-Quantile, Q-Q) 图是检验

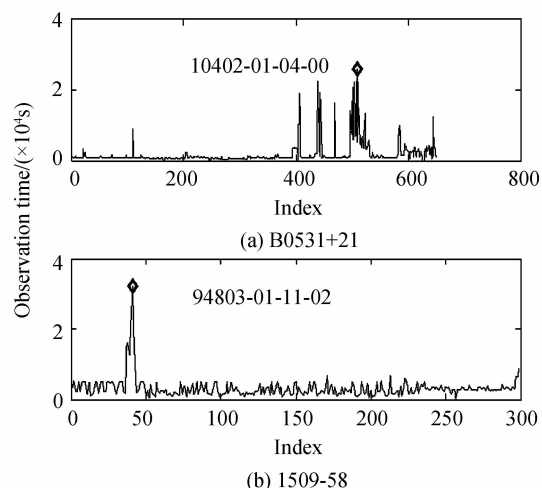


图 2 RXTE 对 X 射线脉冲星的观测时间

Fig. 2 Plot of observation time of the X-ray pulsars using RXTE

的 Heasoft v6.11.1 平台提取的 PCA 观测数据作为实验数据.

信号降噪和估计的评价方法都是假设原始信号或原始图像已知的,而来自于 X 射线脉冲星的原始信号是未知的.为了客观评价信号处理的性能,假设较长时间叠加后获得的高信噪比的脉冲轮廓作为 X 射线脉冲星的原始信号,较短时间内获得的低信噪比的脉冲轮廓作为待降噪和待估计的信号.显然,短时间获得的信号是通过对长时间观测的信号增加噪音而得.通过对 RXTE 观测的大量归档数据分析处理,选取了最长观测时间和最新观测的两组数据作为实验数据,参量如表 1,1 和 3,2 和 4 分别为 PSR B0531+21、PSR B1509-58 的观测数据.这 4 组数据的观测时间和 SNR 均不同,能更好地说明算法的普适性.

采样数据与理论假设分布是否一致的方法之一,在统计信号领域中广泛应用.利用 Q-Q 图验证了 X 射线脉冲星的信号服从于 Poisson 分布的特性.通过图 4(a)可看出 Anscombe 变换逼近于高斯分布,尤其在中间有好的逼近,但在分位数较低时,有明显的阶梯变换.图 4(b)表明 Wavelet-Fisz 很连续地逼近于高斯分布,比 Anscombe 变换有更好的逼近.可见,Wavelet-Fisz 变换比 Anscombe 变换有更好的“高斯化”能力.

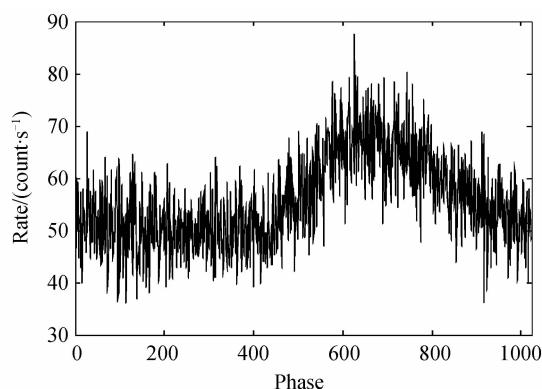


图3 PSR B1509-58 脉冲星信号
Fig. 3 The pulsar profile of PSR B1509-58

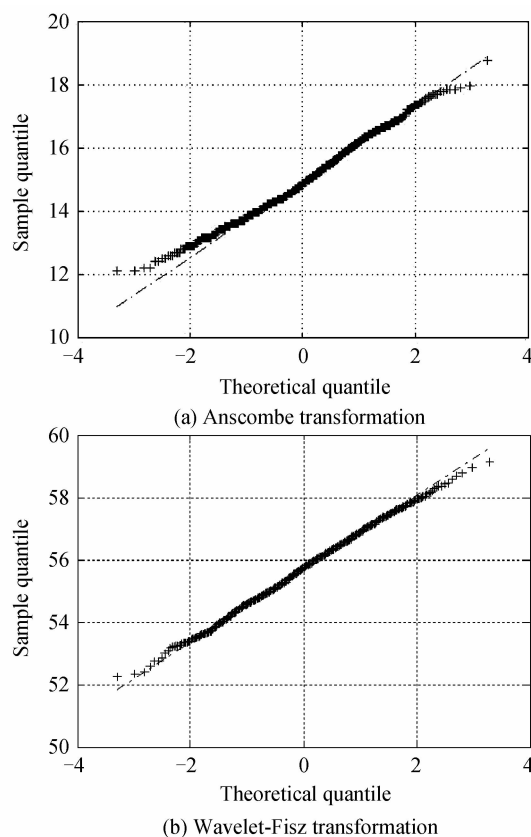


图4 Anscombe 变换和 Wavelet-Fisz 变换的“高斯化”能力
Fig. 4 Gaussianization for Anscombe and Wavelet-Fisz transformation

3.2 强度估计性能分析

分析了基于 Wavelet-Fisz 变换的不同估计方法的性能,这些估计方法都以 Wavelet-Fisz 变换为前提,即 Step 1 和 Step 3 的操作是相同的,只有在 Step 2 中使用不同的降噪方法.由于 Wavelet-Fisz 变换中,有 $F_{wS} \neq SF_w$ (S 为平移操作因子),不具有平移不变性,因此,只对整个算法做一次循环平移操作更合理,即在 Step 1 前作一次平移,在 Step 3 后再移回去,得到一次估计.将多次循环平移获得的估计进行平均得到最终估计.长度为 N 的数据最多循环平移 N 次,而使用 $N/10$ 次的循环平移可得到较好的估计结果.

比较了 Wavelet-Fisz 下通用硬阈值方法 (U)^[14]、Cross-Validation 选择阈值的方法 (CV)^[15] 和贪婪树算法 (Greedy Tree algorithm) 的降噪方法 (GT)^[16] 的估计性能,分别表示为 F&U, F&CV, F>. 在此基础上,研究了它们联合的估计性能.

实验中被估计信号为短时间内获取的光子事件的脉冲轮廓,所用的光子事件均为 100 000 个构成的脉冲轮廓.由于观测时间越长,SNR 越高,从表 1 看出,第 3 组比第 1 组的 SNR 高,第 4 组比第 2 组的 SNR 高.利用表 1 中的实验数据,分析了基于 Wavelet-Fisz 变换对 X 射线脉冲星的信号降噪性能.从表 2 (其中加粗的数据性能较好) 看出,当被估计的 X 射线脉冲星信号的 SNR 较高时 (即第 1 和 4 组数据),贝叶斯多尺度模型 (Bayesian Multiscale Model, BMSM)^[17] 算法比本文的算法效果好,主要原因是前者充分利用了数据的先验信息.虽然本文算法 F&U 和混合算法 (F&U 和 F>) 也获得了较好的效果,但稍差于 BMSM 算法.原因是由于被估计的信号 SNR 较高, Wavelet-Fisz 变换增加了信号的误差,使得性能略有下降.第 2 组和第 4 组数据的 SNR 较低,本文算法比 BMSM 的峰值信噪比 (Peak SNR, PSNR) 都高,主要是由于信号的噪声太强,使得 BMSM 算法失效,无法估计出信号.从而看出,本文提出 Wavelet-Fisz 算法在 SNR 较低时,可得到更优的效果,同时当 SNR 较高时,也可得到与 BMSM 相接近的效果.

表 2 Wavelet-Fisz 算法与其他算法 PSNR 比较

Method	1	2	3	4
F&U	30.98	13.59	26.17	14.27
F&CV	27.79	15.56	19.19	14.27
F>	28.78	12.76	23.38	14.1
F&U F&CV	28.71	13.31	24.14	13.64
F&U F>	28.71	13.24	27.49	13.40
F&CV F>	27.35	14.79	22.56	13.64
BMSM	33.26	12.41	28.80	13.37

累积均方误差 (Normalized Mean Integrated Square Error, NMISE) 为

$$NMISE = E[\sum_{i=0}^N ((\hat{y}_i - y_i)^2 / y_i) / N]$$

式中, y 为原始信号, \hat{y} 为估计信号. 通过 NMISE 评价了算法的性能 (表 3, 其中加粗的数据性能较好), 可知本文算法比 BMSM 算法获得了更好的性能.

为了更直观地分析算法的性能, 分别取 PSR B0531+21 (表 1 第 1 组数据) 和 PSR B1509-58 (表 1 第 2 组数据) 数据为例, 比较了基于 Wavelet-Fisz 算法与 BMSM 的估计效果. 由于 F&CV 对不同 SNR 的估计性能都比较好, 图 5 和图 6 比较了 F&CV 和 BMSM 估计的信号. 从图 5 看出, F&CV 较好地估计出了

PSR B0531+21 信号,由于 Fisz 变换增加了误差,使得主峰两侧产生 2 个尖峰,但并不影响 X 射线脉冲星的相位估计.从图 6 看出,F&CV 和 BMSM 都估计出了 PSR B1509-58 信号的脉冲轮廓,并且 F&CV 更接近于 PSR B1509-58 的理论标准轮廓,而 BMSM 受噪音影响较大,导致峰值的右侧有一个波峰.

从 PSNR 和 NMISE 看出,本文算法能较好地估计 X 射线脉冲星信号,并且比 BMSM 的时间复杂度要低.

表 3 Wavelet-Fisz 算法与其他算法的 NMISE 比较

Table 3 The performance comparison of NMISE

Method	1	2	3	4
F&U	3.98e-6	8.94e-5	1.55e-5	8.48e-5
F&CV	7.82e-6	5.82e-5	2.89e-5	8.48e-5
F>	7.72e-6	1.06e-4	3.32e-5	9.39e-5
F&U F&CV	3.29e-6	9.54e-5	1.40e-5	1.11e-4
F&U F&GV	3.29e-6	9.71e-5	1.15e-5	1.14e-4
F&CV F>	5.35e-6	6.73e-5	1.65e-5	1.11e-4
BMSM	1.53e-6	1.18e-4	7.91e-5	1.10e-4

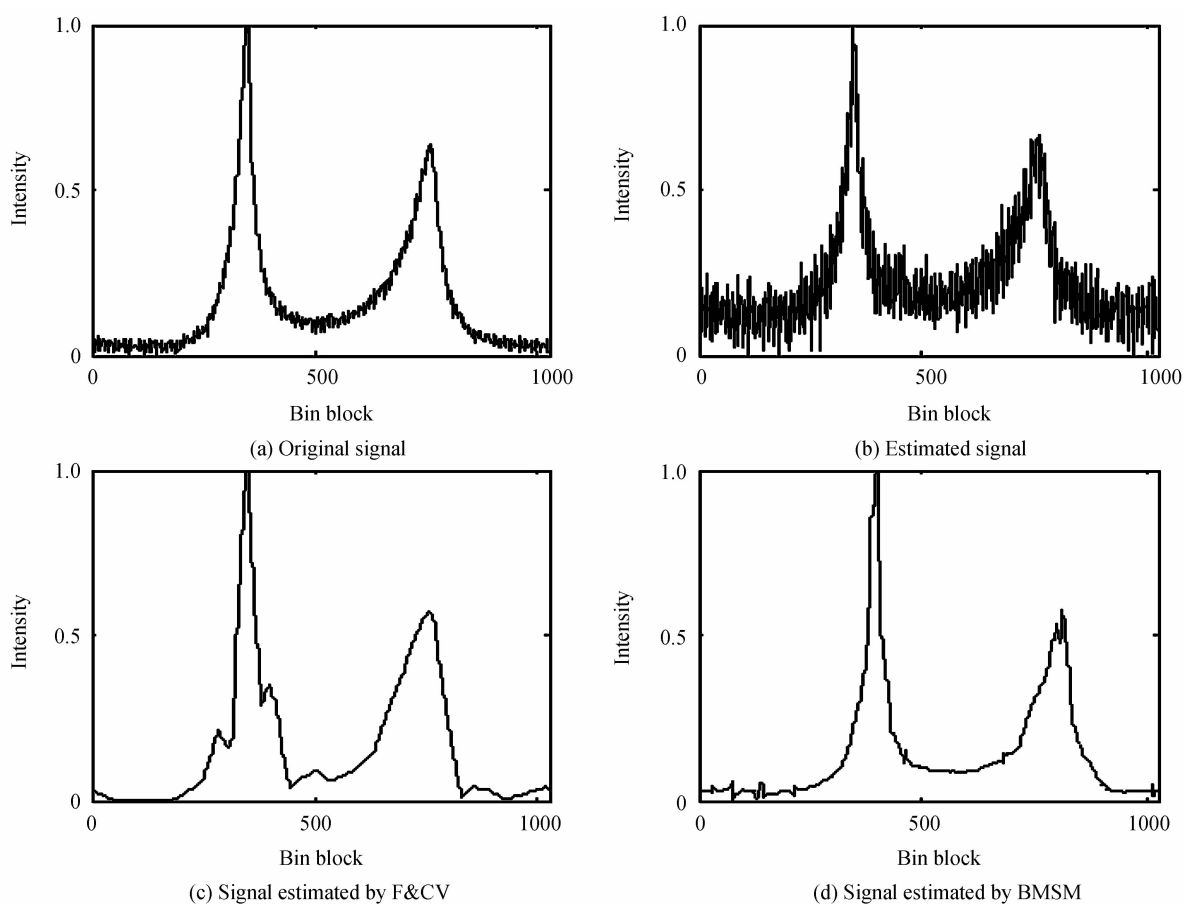
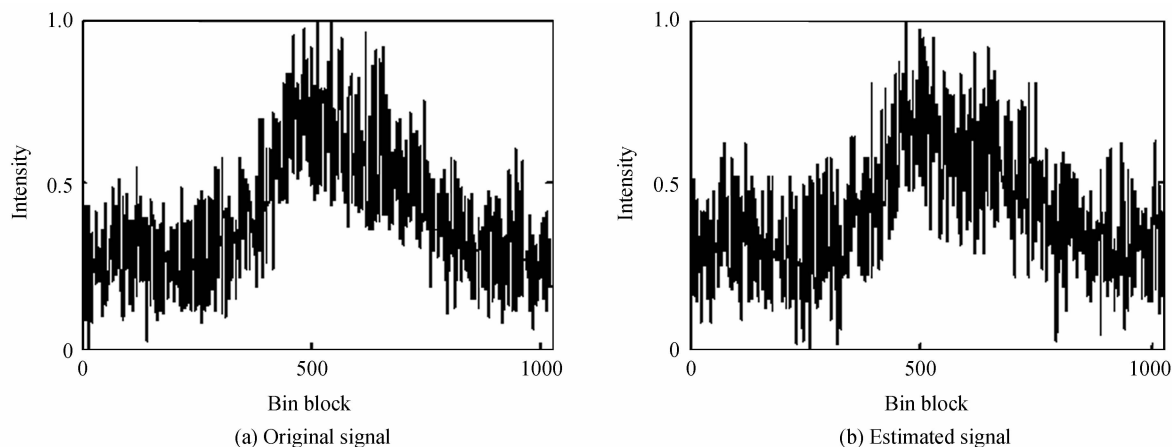


图 5 各种算法对 PSR B0531+21 的估计

Fig. 5 The estimation of various methods for PSR B0531+21



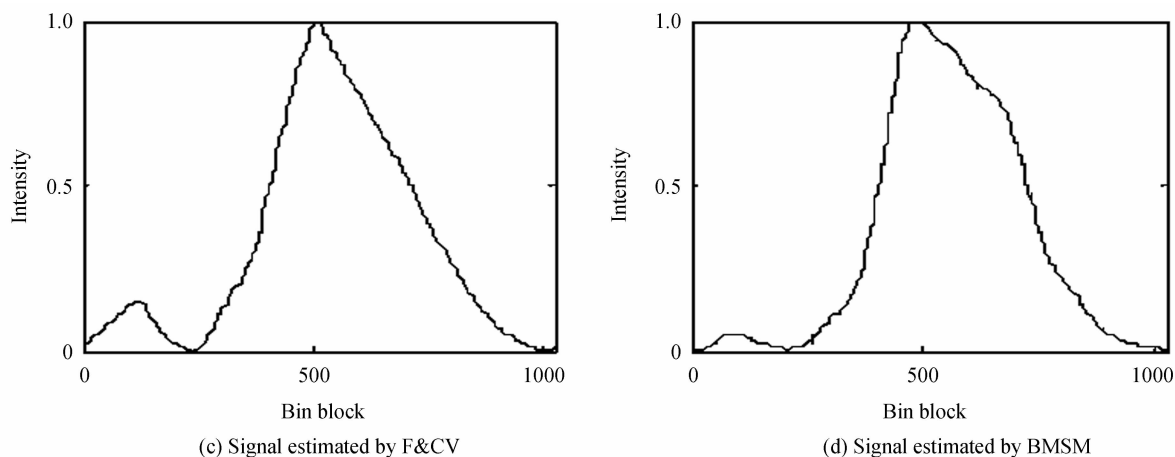


图6 各种算法对 PSR B1509-58 的估计

Fig. 6 The estimation of various methods for PSR B1509-58

4 结论

本文研究了基于 Wavelet-Fisz 变换的 X 射线脉冲星的信号估计方法,提出的方法将 Poisson 噪声特性的 X 射线脉冲星信号变换为具有高斯特性的信号,利用适合于高斯特性的方法对变换后的信号进行降噪和估计.通过 RXTE 探测的 X 射线脉冲星的实测数据分析了 Wavelet-Fisz 变换的估计性能,结果表明该方法在不同 SNR 下都有较好的估计性能,缩短了计算时间,并且拓展了 X 射线脉冲星信号处理的研究空间.

参考文献

- [1] SHEIKH I S. The use of variable celestial X-ray sources for spacecraft navigation[D]. Maryland: University of Maryland, 2005.
- [2] ZACHARY T, ROUMMEL F, REBECCA M. This is SPIRAL-TAP: sparse poisson intensity reconstruction algorithms-theory and practice[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(36): 1084-1096.
- [3] CHARLES C, RASSON J. Wavelet denoising of Poisson-distributed data and applications[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2003(43): 139-148.
- [4] ANSCOMBE F. The transformation of Poisson, binomial and negative binomial data[J]. *Biometrika*, 1948, **35**: 246-254.
- [5] FISZ M. The limiting distribution of a function of two independent variables and its statistical application [J]. *Colloquium Mathematicum*, 1955, **3**: 138-146.
- [6] GAO Guo-Rong, LIU Yan-Ping, PAN Qiong. A differentiable thresholding function and an adaptive threshold selection technique for pulsar signal denoising[J]. *Acta Physics Sinica*, 2012, **61**(13): 139701.
高国荣,刘艳萍,潘琼. 基于小波域可导阈值函数与自适应阈值的脉冲星信号消噪[J]. *物理学报*, 2012, **61**(13): 139701.
- [7] KOLACZYK E. Bayesian multi-scale models for poisson processes [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1999, **94**(447): 920-933.
- [8] PIOTR F, NASON G. A wavelet-Fisz algorithm for Poisson intensity estimation [J]. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2003, **13**(3): 621-638.
- [9] PIOTR F. Haar-Fisz methodology for interpretable estimation of large, sparse, time-varying volatility matrices [C]. Hernando: Universite Catholique de Louvain, 2011.
- [10] SU Zhe, XU Lu-ping, WANG Ting. X-ray pulsar-based navigation semi-physical simulation experiment system[J]. *Acta Physics Sinica*, 2011, **60**(11): 119701.
苏哲,许录平,王婷. X 射线脉冲星导航半物理仿真实验系统研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(11): 119701.
- [11] SHENG Li-zhi, ZHAO Bao-sheng, ZHOU Feng, *et al.* Performance of the detection system for X-ray pulsar based navigation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1071-1076.
盛立志,赵宝升,周峰,等. X 射线脉冲星导航探测器性能研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(9): 1071-1076.
- [12] SHEIKH I, GOLSHAN A, PINES D. Absolute and relative position determination using variable celestial X-ray sources [C]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 2007, **128**: 855-874.
- [13] MARKKU M, ALESSANDRO F. Optimal inversion of the generalized anscombe transformation for poisson-gaussian noise[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(1): 91-103.
- [14] DONOHO D, JOHSTONE I. Ideal spatial adaption by wavelet shrinkage[J]. *Biometrika*, 1994, **81**: 425-455.
- [15] NASON G. Wavelet shrinkage using cross-validation [J]. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 1996, **58**: 463-479.
- [16] BARANIUK R. Optimal tree approximation with wavelets [C]. *SPIE*, 1999, **3813**: 206-214.