

脉冲星信号的模糊阈值小波降噪算法

阎迪, 许录平, 谢振华

(西安电子科技大学电子工程学院, 710071, 西安)

摘要: 为了提高脉冲星辐射脉冲信号的信噪比, 提出了基于模糊阈值的小波降噪算法. 该算法的核心思想为: 引入模糊理论, 通过建立隶属度函数, 计算出每个采样点信号幅值的隶属度, 再利用小波阈值消噪的方法设定门限来分析隶属度, 将隶属度大于门限的采样值划归为信号, 反之为噪声, 从而达到压抑噪声、保留信号的目的. 实验结果表明, 与基于极大极小原理和 Stein 无偏似然原理的降噪方法相比, 基于模糊阈值的小波降噪算法将脉冲信号的信噪比提高了大约 5~6 dB, 同时可以保留信号的细节. 新算法为脉冲星信号处理与应用提供了一个行之有效的算法.

关键词: 模糊阈值; 小波变换; 脉冲星信号; 隶属度函数

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1193-04

Wavelet Denoising Algorithm Based on Fuzzy Threshold for Pulsar Signal

Yan Di, Xu Luping, Xie Zhenhua

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to improve the signal-to-noise ratio (SNR) of the pulsar signal, a wavelet denoising algorithm based on fuzzy threshold is put forward. The core of the algorithm is as follows: firstly, the fuzzy theory is introduced, by formulating the membership functions, the membership grade of each sample is calculated, then the threshold is set up and the membership grade is analyzed by using the wavelet denoising method, the samples that are larger than the threshold are categorized to the signal, and the others to the noise so as to achieve the aim for suppressing the noise and retaining the signal. Simulation result shows that, compared to the two methods based on minimax theory and stein unbiased similar estimate theory respectively, the SNR of the pulsar signal of the proposed algorithm is increased by 5 to 6 dB while keeping the details of it.

Keywords: fuzzy threshold value; wavelet transform; pulsar signal; membership function

脉冲星是一种快速自转并具有强磁场的中子星, 其最重要的特征是自转的周期性和均匀性. 近年来, 脉冲星由于在计时、定位、导航、天体物理学及电波传播学等领域所突现出来的巨大潜力而日益受到科学家们的关注. 然而, 脉冲星处于距地球约 3 000~55 000 光年的遥远深空中, 脉冲星脉冲信号传播到地球站的信号能量仅为 $10^{-25} \sim 10^{-30} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$, 并且由于星际空间物质的干扰, 所采集到的脉

冲星极弱信号往往湮没在噪声中, 因此脉冲星信号的降噪、检测方法研究成为脉冲星应用的前提.

小波变换具有低熵性、多分辨率、去相关性等特点, 在信号去噪方面表现出明显优势. 通过寻找小波变换系数中的局部极大值点并据此重构信号, 可以很好地逼近未被噪声污染前的原始信号^[1], 但随之而来的问题是如何选取阈值. 1995 年, Donoho^[2]首次提出了小波阈值这个概念, 并提出了一种基于阈

值处理思想的小波域去噪技术.在国内,西北工业大学的潘泉等^[3]拓宽了此方法的应用前景,但他们的研究也发现,此方法所采用的硬阈值函数和软阈值函数分别存在着一些缺陷,如硬阈值函数的不连续性、软阈值函数的导数不连续以及由它估计的小波系数与被处理信号的小波系数之间存在恒定偏差等,这些缺陷直接影响了小波消噪的效果.因此,本文的关键是要寻求一种能克服软、硬阈值缺点的阈值选取办法来提高小波消噪的效果.脉冲星辐射脉冲信号在小波域每一层系数的信号成分与噪声成分在不同区域中所占比重明显不同,本文根据这一特征,改进了上述的软、硬阈值方法,引入模糊理论,建立隶属度函数,根据每一个采样点的信号幅值的隶属来确定阈值,进行小波消噪,并分别采用极大、极小阈值、无偏似然(SURE)阈值和本文提出的模糊阈值对 B0329+54 脉冲星的辐射脉冲信号进行小波域消噪对比实验,结果表明本文所提出的方法在压噪并保持细节信号方面具有一定的优势.

1 基于模糊阈值的小波消噪算法

1.1 小波阈值消噪算法原理

一维信号的小波消噪可分为 3 个步骤:

(1)选择小波基和小波分解层数,对输入序列进行小波变换;

(2)依据某原则设置阈值,利用硬阈值或软阈值函数对高频小波系数进行处理;

(3)对阈值操作后的小波系数重构,重构后的结果被认为是信号成分的估计^[4].

小波阈值是一种非线性的方法,它是在小波域内通过对小波系数进行处理来达到去噪目的的.阈值的确定是阈值消噪中的关键步骤,目前广泛采用的阈值可以分为全局阈值和局部阈值两类.全局阈值主要有 Stein 无偏风险阈值、通用阈值、极大极小阈值和启发式阈值等.

(1)Stein 风险阈值(rigrsure 规则):采用 Stein 无偏似然原理(SURE)确定阈值,对给定阈值 λ 进行似然估计,并对非似然估计最小化的一种软阈值选取方法.

(2)通用阈值(sqrtholog 规则):采用固定阈值形式,大小为

$$\lambda = \sigma(2\ln n)^{1/2} \quad \sigma = \frac{\sum_{k=1}^n |\omega_{j,k}|}{0.674 \sqrt{5n}} \quad (1)$$

式中: σ 为噪声信号的均方差; $\omega_{j,k}$ 是第 j 层中第 k 个

小波系数($1 \leq j \leq m, 1 \leq k \leq n$), n 为该层中小波系数的个数, m 为最佳小波分解层数.

(3)极大极小阈值方法(minimax 规则):采用极大极小原理产生阈值,以最小均方误差为目标函数产生一个极值,是基于统计学上的极值估计器原理的一种阈值选取方式.

(4)启发式阈值方法(heursure 规则):采用最优预测变量进行阈值选择^[5].

以上的全局阈值可显著提高信噪比,且运算简单,但由于它对小波域的每一层系数采用同样的规则,因此在降低噪声的同时也破坏了信号的高频信息.与全局阈值不同,局部阈值考查某一点或某一局部的特点,根据灵活的判定原则判定系数中包含的主要是信号成分还是噪声成分,以实现“消噪”和“保留信号”两种处理的优化.所以,在小波分解后,再利用小波函数去噪时又将估计得到的阈值作为局部阈值和软阈值来处理.

1.2 引入模糊阈值改进小波阈值消噪

在通用阈值方法中,常用 λ_j^F 表示确定的第 j 层固定阈值,这种阈值的确定方法很简单,但它被认为是一种当个数增加时会损失更多细节小波系数的保守方法.当小波分解层数 n 趋于 ∞ 时,细节小波系数比 λ_j^F 大的可能性趋于 0.用 λ_j^S 表示利用上述 Stein 无偏风险阈值方法确定的第 j 层阈值,相对固定阈值 λ_j^F , λ_j^S 更有弹性,当信号重构时,随着噪声的增大,这种阈值选取方法可以包括更多细节小波系数,但在信噪比的提高方面不具优势.

因此,本文的研究目的是寻求一个折中的模糊成员函数,使得细节小波系数介于 λ_j^F 和 λ_j^S 之间^[6].由于本文采用的脉冲星信号符合一种偏大型模糊分布,其隶属度函数的一般形式可以写为

$$A(\omega_{j,k}) = \begin{cases} 0 & \omega_{j,k} \leq a \\ f(\omega_{j,k}) & \omega_{j,k} > a \end{cases} \quad (2)$$

式中: a 为常数,是隶属度函数曲线与横坐标轴的交点到原点的距离; $f(\omega_{j,k})$ 为不增函数,可通过对它的选择得到不同的偏大型模糊分布.采用升半梯形隶属函数^[7]时,相应的 $f(\omega_{j,k})$ 表达式为

$$f(\omega_{j,k}) = \begin{cases} \frac{\omega_{j,k} - a}{b - a} & a < \omega_{j,k} \leq b \\ 1 & \omega_{j,k} > b \end{cases} \quad (3)$$

采用升岭形隶属度函数时,相应的 $f(\omega_{j,k})$ 的表达式为

$$f(\omega_{j,k}) =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{b-a} \left(\omega_{j,k} - \frac{b+a}{2} \right) \right] & a < \omega_{j,k} \leq b \\ 1 & b < \omega_{j,k} \end{cases} \quad (4)$$

式中: b 为隶属度函数曲线与直线 $A(\omega_{j,k})=1$ 的交点的横坐标值. a 和 b 的最佳值可以通过在下限 λ_j^S 和上限 λ_j^F 之间为隶属度函数赋合适的值来决定. 由于小于 λ_j^S 的细节小波系数最有可能由噪声产生, 所以当细节小波系数等于 λ_j^S 时, 将隶属度函数值设为接近 0, 用 Δ 来表示. 同样, 因为值大于 λ_j^F 最有可能由原始信号产生, 当细节小波系数等于 λ_j^F 时, 可将隶属度函数值改为接近 1, 用 $1-\Delta$ 来表示. 分别将 λ_j^S 、 Δ 、 λ_j^F 、 $1-\Delta$ 代入式(3)得

$$\left. \begin{aligned} \frac{\lambda_j^S - a}{b - a} &= \Delta \\ \frac{\lambda_j^F - a}{b - a} &= 1 - \Delta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\lambda_j^S - \Delta(\lambda_j^S + \lambda_j^F)}{1 - 2\Delta} &= a \\ -\frac{\lambda_j^F - \Delta(\lambda_j^S + \lambda_j^F)}{1 - 2\Delta} &= b \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\lambda_j^S > a, \lambda_j^F \leq b$$

对于升岭型隶属度函数, 分别用 λ_j^S 、 Δ 、 λ_j^F 、 $1-\Delta$ 代入式(4), 解得

$$\left. \begin{aligned} \lambda_j^S - \frac{\pi(\lambda_j^S - \lambda_j^F)}{4\arcsin(2\Delta - 1)} - \frac{2\arcsin^2(2\Delta - 1)}{\pi^2(\lambda_j^S - \lambda_j^F)} &= a \\ \lambda_j^S + \frac{\pi(\lambda_j^S - \lambda_j^F)}{4\arcsin(2\Delta - 1)} - \frac{2\arcsin^2(2\Delta - 1)}{\pi^2(\lambda_j^S - \lambda_j^F)} &= b \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\lambda_j^S > a, \lambda_j^F \leq b$$

2 降噪的实现及仿真结果对比

本文采用 B0329+54 脉冲星信号数据, 脉冲星信号的周期为 714.519 7 ms, 其微弱信号经消色散后, 在一段时间内的积累信号如图 1 所示.

下面采用模糊阈值小波降噪方法, 首先在小波域采用小波函数 wavedec^[8] 进行小波分解, 然后采用本文提出的方法计算每个采样点幅值的隶属度, 确定阈值, 再调用小波降噪压缩函数 wdencmp 完成降噪处理, 图 2 和图 3 分别是采用升半梯形和升岭形隶属度函数确定的阈值消噪在 Matlab 7.0 环境下仿真的结果.

由图 2、图 3 可以看出, 采用模糊阈值方法进行

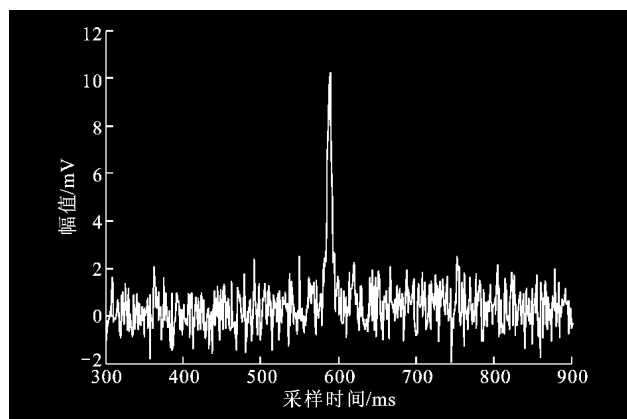


图 1 单周期脉冲星 B0329+54 积累信号波形

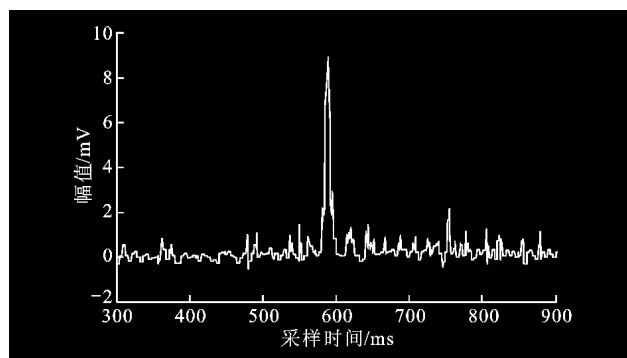


图 2 用升半梯形隶属度函数确定模糊阈值消噪后的脉冲星信号

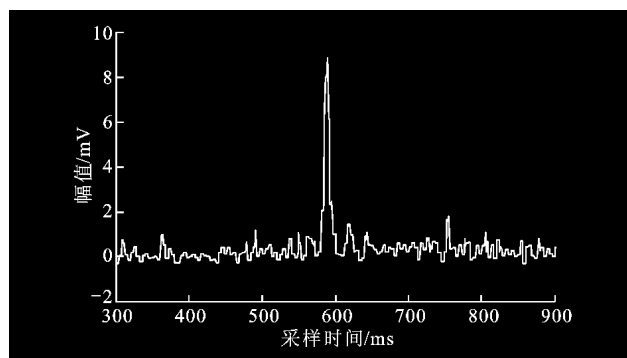


图 3 用升岭形隶属度函数确定模糊阈值消噪后的脉冲星信号

小波去噪之后, 信号的信噪比有了显著的提高, 使信号轮廓更明显、清晰并且没有损失细节信号, 保持了与原始信号的逼真度.

表 1 示出了两种方法消噪前后的脉冲星信号平均信噪比对比.

表 1 采用模糊阈值消噪前后信号信噪比比较

脉冲星信号	平均信噪比/dB
原始信号	27.066 7
用升半梯形隶属度函数确定模糊阈值消噪后	32.769 8
用升岭形隶属度函数确定模糊阈值消噪后	33.568 1

本文采用极大极小值原理、SURE 原理确定阈值进行消噪的结果如图 4 所示。

可以看出,一般的阈值消噪方法在消除噪声方面有一定的效果,但同时有用信号有一定的损失,也丢失了细节信息,而由于用本文的方法得到的信号波形保留了细节信息,所以在脉冲星信号主峰旁边可以观察到微脉冲。类似地,可以比较利用模糊理论与利用 SURE 原理确定阈值消噪的结果,如图 5 所示。

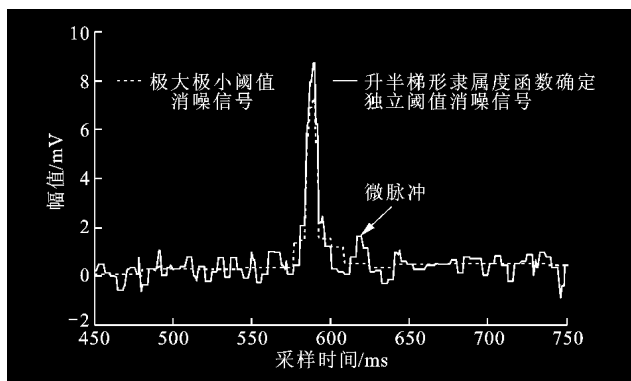


图 4 用模糊理论与极大极小值原理确定阈值消噪结果比较

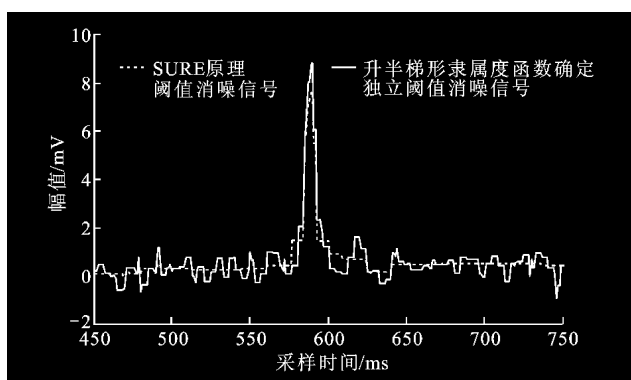


图 5 用模糊理论与 SURE 原理确定阈值消噪结果比较

3 结束语

本文通过对模糊理论的引入,提出了一种小波去噪阈值选取的方法。由于小波变换在信号处理和噪声去除方面的优势,使得小波变为日益重要的一种信号处理手段,但是目前的软硬阈值以及最大最小、SURE 原理确定阈值方法在信号消噪时都存在消噪效果不明显或者“过扼杀”^[9]等弊端,而本文提出的模糊阈值确定的算法使得小波变换去除噪声有

了更加明显而优越的效果,可在保持有用信号不受损失的同时消除噪声。

参考文献:

- [1] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [2] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on IT, 1995 41(3): 613-627.
- [3] 潘泉, 戴冠中, 张洪才, 等. 基于阈值决策的子波域去噪方法[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 115-117.
Pan Quan, Dai Guanzhong, Zhang Hongcai. A threshold selection method for hard-threshold filter algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(1): 115-117.
- [4] 周怀来, 李录明, 罗省贤, 等. 基于小波变换的改进阈值函数自适应去噪方法[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(2): 173-177.
Zhou Huailai, Li Luming, Luo Shengxian, et al. A method of improved threshold function denoising based on wavelet analysis [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 28(2): 173-177.
- [5] 何洪英, 姚建刚, 王玲. 一种基于 Bayes 估计的小波自适应绝缘子红外图象去噪方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 37-41.
He Hongying, Yao Jiangang, Wang Ling. Wavelet adaptive method for insulator infrared image denoising based on Bayes estimation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 37-41.
- [6] Shark L K, Yu C. Denoising by optimal fuzzy thresholding in wavelet domain [J]. Electronics Letters, 2000, 36(6): 581-582.
- [7] 闻新, 周露, 李东江, 等. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [9] 崔华, 宋国乡. 基于小波阈值去噪方法的一种改进方案[J]. 现代电子技术, 2005, 28(1): 8-10.
Cui Hua, Song Guoxiang. A kind of modified project based on the wavelet threshold denoising method [J]. Modern Electronic Technique, 2005, 28(1): 8-10.

(编辑 刘杨)