

小波域中的维纳滤波在综合脉冲星时算法中的应用

仲崇霞^{1) 2) 3)} 杨廷高¹⁾

1) 中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) 北京无线电计量测试研究所, 北京 100854)

(2006 年 12 月 18 日收到, 2007 年 3 月 16 日收到修改稿)

脉冲星自转非常稳定, 可用作时间标准. 然而由单脉冲星定义的脉冲星时受多种噪声源的影响, 其频率稳定度还不够好, 因此可采取对多颗脉冲星定义的脉冲星时进行综合的方法来削弱各噪声源的影响, 以提高脉冲星时的稳定度. 不同的脉冲星有着各自不同的自转频率, 在不同频段所受噪声的影响也不同, 应用小波分析的方法对脉冲星时做综合, 可以兼顾脉冲星时的长期与短期稳定度, 在不同的频率范围取不同的权值以达到更好的结果; 脉冲星的计时残差是由计时参考的原子时的误差和脉冲星计时误差两部分引起的, 用维纳滤波的方法可以将两者分开, 并主要以消除掉参考钟误差后的残差为计时残差实现对脉冲星计时的综合. 在这两种方法的基础上, 提出一种基于小波域中的维纳滤波方法, 利用小波独有的特性和维纳滤波最小误差估计的优点, 更有效地消除噪声对脉冲星时的影响. 实验结果表明, 该方法可以有效降低脉冲星计时残差中的噪声影响.

关键词: 综合脉冲星时, 小波分析, 维纳滤波, 小波域中的维纳滤波

PACC: 9760G, 9575, 9575M

1. 引 言

在 1967 年发现了脉冲星后不久就清晰地显示出脉冲星的旋转稳定度使得可把它们用作一种天体钟^[1], 尤其是 1982 年发现了毫秒脉冲星 PSR B1937+21 后这种形势变得更加明显^[2]. 对毫秒脉冲星脉冲到达时间典型的测量准确度在几个微秒的水平, 对某些毫秒脉冲星来说已经达到几百个纳秒的水平. 如果相应的观测时间跨度达到 10^8 秒量级, 脉冲星钟的相对稳定度将好于 10^{-14} ^[3], 与原子钟的相对稳定度可比. 有着这样的高稳定度, 脉冲星可用于时间度量和守时.

由单脉冲星定义的脉冲星时 PT 受原子时误差、行星历表的不确定性、星际介质传播的影响、宇宙初始背景引力波的影响、脉冲星自身的不稳定性等几种噪声源的影响^[4], 除原子时本身的噪声外, 可认为其他的噪声源对不同的脉冲星是独立的. 通过对多颗脉冲星定义的脉冲星时 PT_i 加权平均建立综合脉冲星时间 PT_{ens} , 来削弱各独立噪声源的影响. 小波分解算法可对不同的脉冲星时间信号在不同频

率范围内取不同的权值来进行加权平均, 能够有效抑制不同频率上噪声的影响; 维纳滤波算法能将原子钟和脉冲星本身对拟合后的脉冲星计时残差的影响分开, 并主要以参考钟误差为计时残差实现对脉冲星计时的综合. 本文提出一种将这两种方法结合的综合脉冲星时算法——小波域中的维纳滤波算法.

2. 小波分解算法

对于时频分析来说, 用的最多的就是傅里叶变换. 但是傅里叶变换是全域的, 不能提供时间与频率的相关信息. 为克服这个缺点 Gabor 引进了“窗口”傅里叶变换, 窗口傅里叶变换在时域和频域内均有局域化功能, 但是窗口傅里叶变换的时域、频域窗口的大小是固定不变的, 没有自适应性, 不适于分析多尺度信号和突变过程. 小波变换继承和发展了窗口傅里叶变换. 一个小波基函数的作用相当于一个窗口函数, 小波平移相当于窗口的平移. 小波分析是比较理想的时频分析工具^[5].

信号 $f(x)$ 的小波变换^[6]为

$$W_{f(a,b)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \bar{\Psi}_{a,b}(x) dx, \quad (1)$$

其中 $\bar{\Psi}_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 它是窗函数 $\Psi(t)$

经时间平移 b 和尺度伸缩 a 作用的结果. 小波变换分离的信号是按时间和尺度来划分的, 这就是时频域分析. 它将信号按不同的频率成分按尺度逐步分离出来, 在小尺度有高频信号, 大尺度有低频信号.

脉冲星时的噪声包括原子时误差、脉冲星自转随机变化、星际介质传播、行星历表不确定性等^[4]. 这些噪声在不同的频率分量是不同的, 而经典的加权算法考虑不到脉冲星时的噪声在不同频率分量的不同稳定度, 用小波分解的方法可以解决这个问题.

将脉冲星的脉冲到达信号展开为小波级数^[7]:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f_i \varphi_{j_0,k} \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_{j=-\infty}^{j_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f_i \phi_{j,k} \phi_{j,k}(t). \quad (2)$$

用小波尺度的观点将信号分为两个层次: j_0 以上为基本特征提取, j_0 以下为细节近似. 对测量的第 i 个信号 (2) 式可写成^[7]

$$f^i(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \beta_{j_0,k}^i \varphi_{j_0,k}(x) + \sum_{j=-\infty}^{j_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_{j,k}^i \phi_{j,k}(x). \quad (3)$$

脉冲星的时-频能量分布可表示为

$$E_f = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)| \frac{da db}{a^2}. \quad (4)$$

对二进小波变换, 在某一局部频率范围内, 脉冲星信号的能量可表示为

$$E_j = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{k=n_1}^{n_2} (n_2 - n_1) \alpha_{j,k}^2} \\ \frac{1}{\sum_{k=n_1}^{n_2} (n_2 - n_1) \beta_{j,k}^2} \end{cases} \quad (5)$$

信号的局部能量分布与方差具有相同的量纲, 不失一般性, 定义

$$\sigma_j^2 = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{k=n_1}^{n_2} (n_2 - n_1) \alpha_{j,k}^2} \\ \frac{1}{\sum_{k=n_1}^{n_2} (n_2 - n_1) \beta_{j,k}^2} \end{cases} \quad (6)$$

这样 σ_j 就表示在小波尺度 j 下的多分辨率加权. 一般的, l 个信号 $f^i(x)$ ($i=1, \dots, l$) 的加权和, 即

$$\bar{f}(x) = \frac{\sum W_i f^i(x)}{\sum W_i}, \quad (7)$$

其中 W_i 表示信号的加权. 根据小波变换及其重构关系, 上式也可写成

$$\bar{f}(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{\sum_i \sigma_j^i \beta_{j_0,k}^i \varphi_{j_0,k}(x)}{\sum_i \sigma_j^i} \right\} + \sum_{j=-\infty}^{j_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\sum_i \sigma_j^i \alpha_{j,k}^i \phi_{j,k}(x)}{\sum_i \sigma_j^i}, \quad (8)$$

其中 σ_j^i 表示信号 $f^i(x)$ 在小波尺度 j 时的多分辨率加权.

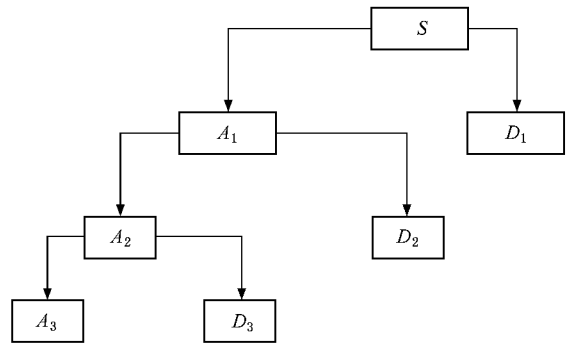


图 1 三层小波分解树结构

图 1 为三层小波分解树^[8], 在本文中用三层 Daubechies 小波分析算法对脉冲星 PSR B1855 + 09 和脉冲星 PSR B1937 + 21 的计时残差进行综合.

3. 维纳滤波算法

假定 n 个观测量 $r = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ 为已知. r 是互不相关的两个量的和, $r = s + \varepsilon$, 其中 s 为脉冲星计时残差中由参考钟的误差引起的部分, ε 是与脉冲星本身有关的计时噪声. s 和 ε 都应该与理想时间尺度联系在一起. 维纳滤波(线性最小均方误差滤波)就是将脉冲星的计时残差输入维纳滤波器 H 输出即为估计的由参考钟的误差引起的残差 \hat{s} . 滤波过程如图 2 所示^[9].

对于 r, s, ε , 它们的协方差方程可写成下面的形式:

$$\begin{aligned} \text{cov}(r, r) &= r_i r_j = s_i s_j + \varepsilon_i \varepsilon_j, \\ \text{cov}(s, s) &= s_i s_j, \end{aligned}$$

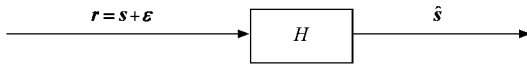


图2 维纳滤波器的输入-输出关系

$$\begin{aligned} \text{cov}(s, r) &= s_i, r_j = s_i, s_j, \\ \text{cov}(\varepsilon, \varepsilon) &= \varepsilon_i, \varepsilon_j, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\bar{\cdot}$ 代表综合平均. 如果测量值 r 和方程(18)已知, 可用维纳滤波器推断出信号 s 的估计^[10]为

$$\hat{s} = Q_{sr} Q_{rr}^{-1} r, \quad (10)$$

和

$$D_{ss} = Q_{ss} - Q_{sr} Q_{rr}^{-1} Q_{rs}, \quad (11)$$

其中协方差矩阵 Q_{rr}, Q_{sr}, Q_{ss} 是以 Toeplitz 矩阵的形式构建的, 相应的协方差为 $a_i, a_j = q(\tau) = q(t_i - t_j) = q_{i-j}$,

$$Q_{aa} = \begin{bmatrix} q_0 & q_1 & q_2 & \cdots & q_{n-1} \\ q_1 & q_0 & q_1 & \cdots & q_{n-2} \\ q_2 & q_1 & q_0 & \cdots & q_{n-3} \\ & & & \ddots & \\ q_{n-1} & q_{n-2} & q_{n-3} & \cdots & q_0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

目前还不可能脱离参考钟来实施脉冲星计时观测, 因此要分开协方差 s_i, s_j 和 $\varepsilon_i, \varepsilon_j$ 必须对至少两颗脉冲星在同一参考时间尺度进行观测. 这样, 结合脉冲星脉冲到达时间就可以确定信号和噪声的协方差了^[11]:

$$\begin{aligned} {}^1 r_i + {}^2 r_i, {}^1 r_j + {}^2 r_j &= {}^1 \varepsilon_i, {}^1 \varepsilon_j + {}^2 \varepsilon_i, {}^2 \varepsilon_j \\ &+ {}^1 \varepsilon_i, {}^2 \varepsilon_j + {}^2 \varepsilon_i, {}^1 \varepsilon_j \\ &+ 4 s_i, s_j, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} {}^1 r_i - {}^2 r_i, {}^1 r_j - {}^2 r_j &= {}^1 \varepsilon_i - {}^2 \varepsilon_i, {}^1 \varepsilon_j - {}^2 \varepsilon_j \\ &= {}^1 \varepsilon_i, {}^1 \varepsilon_j + {}^2 \varepsilon_i, {}^2 \varepsilon_j \end{aligned}$$

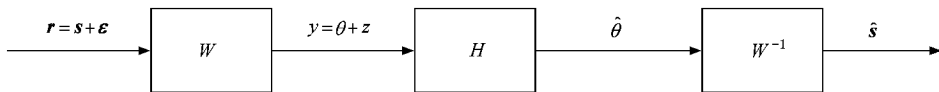


图3 小波域中的维纳滤波过程

从含噪声的脉冲星时间信号 r 输入到估计值输出 \hat{s} , 可以写成为 $\hat{s} = W^{-1} H W r$.

毫秒脉冲星 PSR B1937 + 21 和 PSR B1855 + 09 的计时残差分别通过三层 Daubechies 小波分解滤波器 W 后得到各层分解系数 y , 即第二部分中(3)式中的 α 和 β , 再将这些系数通过维纳滤波器 H 得到参考钟的残差 s (信号中的有用成分)的小波分解系数的估计值 $\hat{\theta}$, 滤波器 H 由第三部分中(10)(12)和

$$- {}^1 \varepsilon_i, {}^2 \varepsilon_j - {}^2 \varepsilon_i, {}^1 \varepsilon_j, \quad (14)$$

可以认为互协方差 ${}^2 \varepsilon_i, {}^1 \varepsilon_j = {}^1 \varepsilon_i, {}^2 \varepsilon_j = 0$, 方程(13)减方程(14)得

$$\begin{aligned} s_i, s_j &= ({}^1 r_i + {}^2 r_i, {}^1 r_j + {}^2 r_j \\ &- {}^1 r_i - {}^2 r_i, {}^1 r_j - {}^2 r_j) / 4. \end{aligned} \quad (15)$$

在(10)式中, 矩阵 Q_{rr}^{-1} 可用作白化滤波器. 在含噪声的残差里提供了白化数据, 由这些白化数据形成矩阵 Q_{ss} .

在实际的运算中, 根据主要的功率谱 S_{ij} 和 Wiener-Khinchine 定理计算的残差的协方差方程要好于根据定义式 $q_{i-j} = r_i, r_j$ 定义的, Wiener-Khinchine 定理^[12]的计算公式为

$$q_{i-j} = \int_0^\infty S_{ij} \cos \omega \tau d\omega. \quad (16)$$

对脉冲星 PSR B1855 + 09 和 PSR B1937 + 21 观测是在 UTC 的时间尺度下得到的计时数据, 因此被估计的信号是协调世界时与脉冲星时的差值, 即, $s = UTC - PT^{[13]}$.

4. 小波域中的维纳滤波算法

对于含噪声的脉冲星时间信号 r , 设 s 为真实信号, ε 为噪声, 它们满足加性条件, 即 $r = s + \varepsilon$. 它们的小波变换分别表示为 $y = W r, \theta = W s, z = W \varepsilon$. 对信号 r 的去噪过程如图3所示, 其中 H 为维纳滤波器, 它的输出 $\hat{\theta}$ 可以认为是对真实信号 s 的小波系数 θ 的估计, 最后, $\hat{\theta}$ 通过小波逆变换 W^{-1} 得到真实信号 s 的估计值 \hat{s} , 即信号恢复.

(16)式解算出; 最后将得到的信号系数估计值通过小波逆滤波变换器最终得到信号的估计值 \hat{s} .

5. 计算结果及分析讨论

先对观测毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 和 PSR B1937 + 21 得到的计时残差^[12]进行间隔 5 d 的滑动平均, 然后对平滑后的计时残差利用三次样条插值

方法进行插值计算,得到儒略日 MJD 从 46450 到 48950 时间间隔为 10 d 的 251 个数据点. 图 4 和图 5 分别为原始的和插值后的计时残差,很明显,图 5 比图 4 平滑了很多,也就是说滑动平均和插值将一部分噪声的影响平滑掉了.

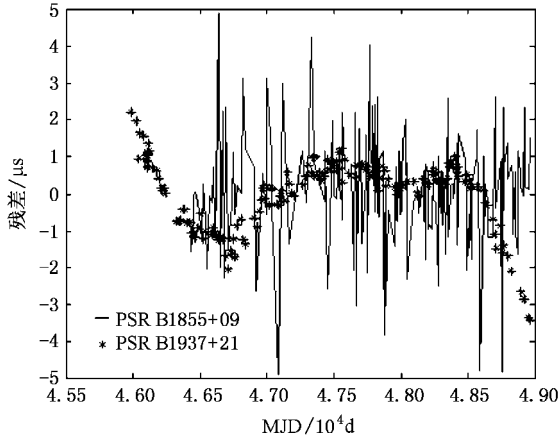


图 4 观测得到的脉冲星 PSR B1855 + 09 和 PSR B1937 + 21 的计时残差

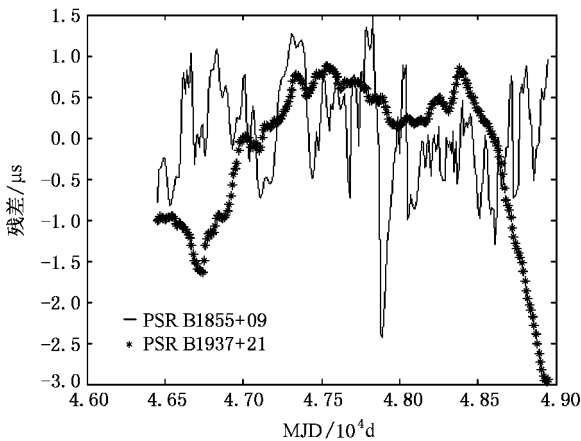


图 5 对脉冲星 PSR B1855 + 09 和 PSR B1937 + 21 观测数据插值后的计时残差

图 6 为毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 的计时残差以及经过三层 Daubechies 小波分解后的各层分解系数. 图中, $ss1$ 为插值后得到的毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 的计时残差, $ca3$ 和 $cd3$ 分别为第三层分解的低频和高分分解系数, $cd2$ 和 $cd1$ 分别为第二层和第一层分解的高频分解系数.

图 7 为毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 的计时残差以及各层分解后系数经过维纳滤波后的估计系数. 图中 $x2$ 为插值后得到的毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 的计时残差, $ca312$, $cd312$, $cd212$, $cd112$ 分别为图 6

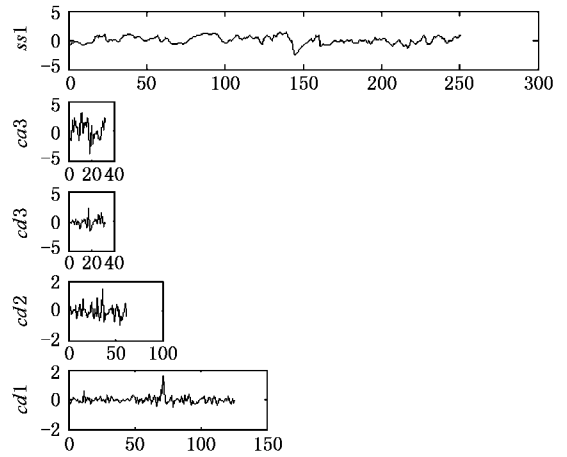


图 6 毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 插枝后计时残差与用 Daubechies 小波分解后的各层分解系数

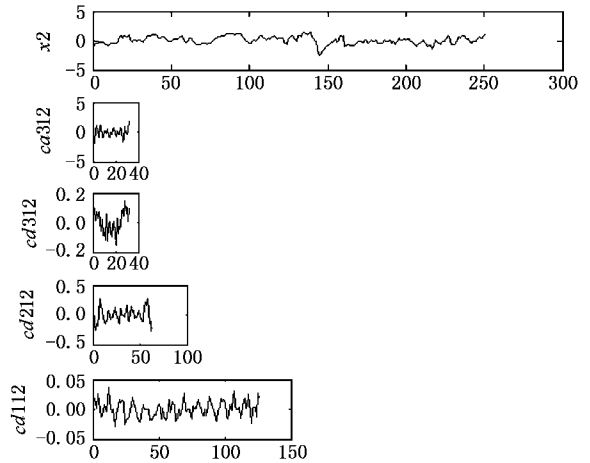


图 7 毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 插值后计时残差及其经 Daubechies 小波分解和维纳滤波后的各层分解系数

中 $ca3$, $cd3$, $cd2$, $cd1$ 经过维纳滤波后得到的消除掉原子时误差影响后的估计系数.

图 8 为各层估计系数经过三层 Daubechies 小波逆滤波变换的重构及合成重构图. 图中 $a23$, $d23$, $d22$, $d21$ 分别为图 7 中 $ca312$, $cd312$, $cd212$, $cd112$ 各系数经过小波逆滤波变换后的系数重构, $a20$ 为合成重构, 即经过小波变换、维纳滤波和小波逆变换后毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 的计时残差的估计值.

经过同样处理后得到的毫秒脉冲星 PSR B1937 + 21 的计时残差也有与毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 的计时残差类似的分解系数、滤波后的估计系数和经过小波逆滤波变换的重构图, 这里就不再赘述.

经过各种处理后两颗毫秒脉冲星的计时残差用

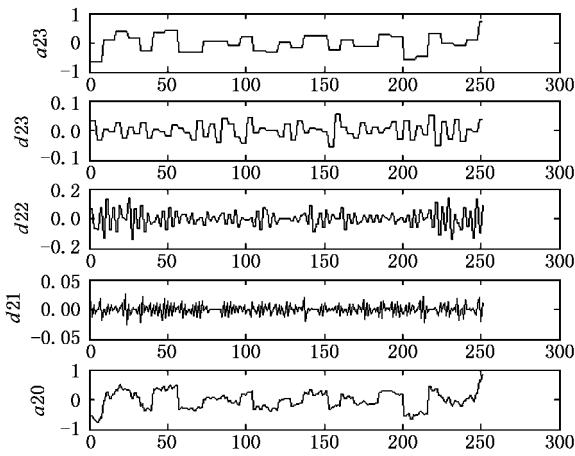


图 8 毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 计时残差滤波后各层分解系数的重构以及合成重构

图 9 表现出来. 比较图 5 与图 9, 很明显, 计时残差经过小波分解滤波器、维纳滤波器、小波重构滤波器后得到的原计时残差的估计值, 即主要以消除参考钟误差后剩余的残差为计时残差的估计信号, 要比插值后的计时残差平滑得多, 而且残差波动幅度小, 残差绝对值都在 $1 \mu\text{s}$ 以内.

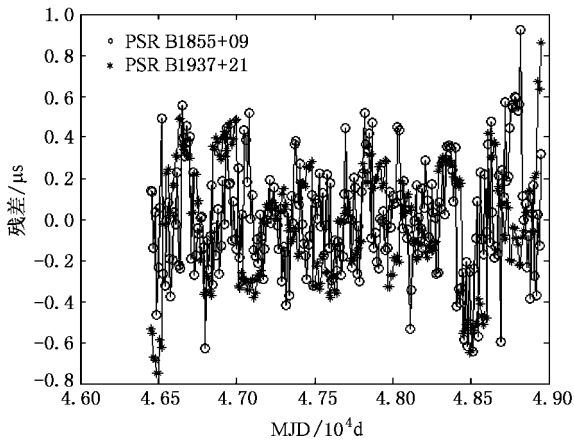


图 9 小波域中维纳滤波处理后两颗毫秒脉冲星的计时残差

图 10 为用小波域中维纳滤波方法对两颗毫秒脉冲星的计时残差进行综合的结果, 我们可以看出, 这样得到的综合脉冲星时比任何一颗脉冲星定义的脉冲星时都要好很多, 残差的绝对值几乎都小于 $0.5 \mu\text{s}$.

脉冲星时的稳定度是由 $\sigma^2 z(\tau)$ 表示的, 图 11 给出了以对数形式表示的插值后单脉冲星时的稳定度, 图 12 给出了经过小波域中维纳滤波处理后的单脉冲星时的稳定度, 从这两个图中我们可看出, 由毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 定义的脉冲星时经过小波

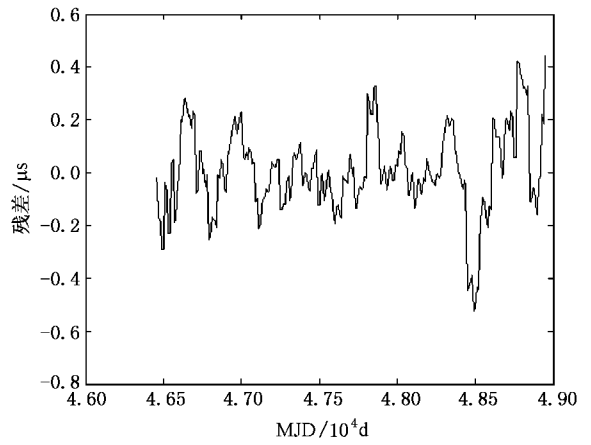


图 10 小波域中维纳滤波处理后两颗毫秒脉冲星计时残差的综合

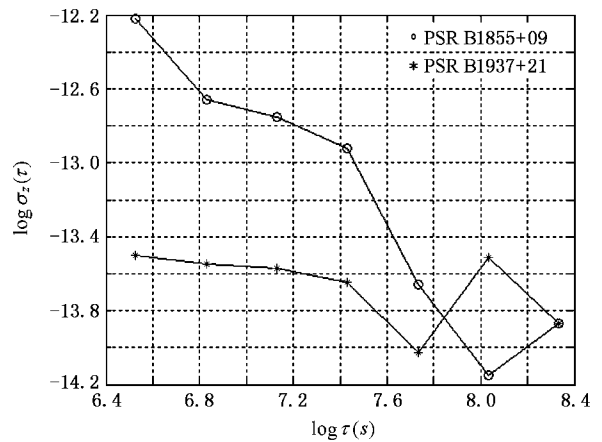


图 11 由单颗脉冲星定义的脉冲星时的稳定度

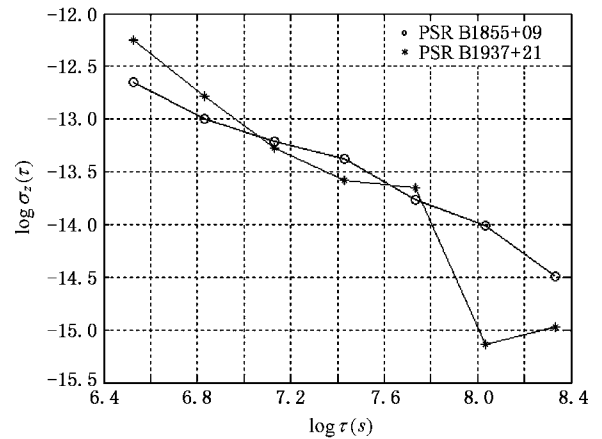


图 12 两颗脉冲星经过小波域中维纳滤波处理后的计时残差的稳定度

域中维纳滤波处理后, 无论短期稳定度还是长期稳定度都比原来的稳定度好得多, 而由毫秒脉冲星 PSR B1937 + 21 定义的脉冲星时经过小波域中维纳

滤波处理后,长期稳定度比原来的稳定度好了一个量级.

图 13 为分别用维纳滤波算法、小波分析算法和用小波域中维纳滤波算法对由毫秒脉冲星 PSR B1855 + 09 和 PSR B1937 + 21 定义的脉冲星时做综合得到的综合脉冲星时的稳定度,显然,维纳滤波算法所得综合脉冲星时的稳定度略好于小波分析算法所得综合脉冲星时的稳定度,而小波域中维纳滤波算法所得综合脉冲星时的稳定度几何处处都比维纳滤波和小波分析算法所得综合脉冲星时的稳定度要好,与图 11 相比,用任何方法得到的综合脉冲星时的稳定度都比由单星定义的脉冲星时的稳定要好

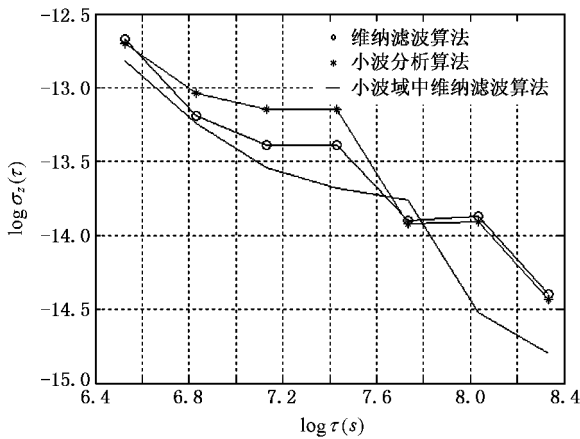


图 13 三种方法对两颗毫秒脉冲星计时残差综合后的结果的稳定度

得多.

6. 结 语

由单星定义的脉冲星时受多种噪声的影响,其的稳定度还不够好,而将多颗脉冲星定义的脉冲星时进行综合算法后得到的综合脉冲星时在很大程度上削弱了噪声源的影响,使得综合脉冲星时的稳定度得到提高.而被称作“数学显微镜”的小波分析方法是数据、信号和图像处理中非常有用的工具,在很多领域都有了较广泛的应用.将它用于脉冲星时间综合,大大提高了脉冲星时的稳定度.由于各脉冲星计时误差之间以及它们与参考原子钟噪声之间是相互独立的,根据维纳滤波(又称最小平方滤波,或最佳滤波)的理论,可将维纳滤波算法用于计算综合脉冲星时,这样可以基本消除计时残差中除参考钟的噪声之外的噪声影响,提高综合脉冲星时的稳定度.在这两种方法的基础上,提出了一种小波域中的维纳滤波方法,将它用于综合脉冲星时算法,结果表明,这种算法比前面提到的任何一种综合脉冲星时算法都要好.由于资料有限,本文中只用了两颗毫秒脉冲星的计时观测数据进行归算,这样得到的结果并不是太好,可以通过增加参与综合的脉冲星的个数来改善综合脉冲星时的结果.

[1] Hewish A , Bell S J , Pilkington J D H , Scott P F , Collins R A 1968 *Nature* **217** 709
 [2] Backer D C , Kulkarni S R , Heiles C , Davis M M , Goss W M 1982 *Nature* **300** 615
 [3] Petit G , Tavella P 1996 *A&A* **308** 290
 [4] Kaspi V M 1995 *ASP Conference Series* **72** 345
 [5] Mallat S , translated by Yang L H , Dai D Q , Huang W L , Zhan Q H 2002 *A Wavelet Tour of Signal Processing (Second Edition)* (Beijing : Machine and Industry Press) p2 (in Chinese) [Mallat S 著 杨力华、戴道清、黄文良、湛秋辉译 2002 信号处理的小波导引 (北京 : 机械工业出版社) 第 2 页]
 [6] Deng Y Q , Xing Q R , Lang L Y , Chai L , Wang Q Y , Zhang Z G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5225 (in Chinese) [邓玉强、邢岐荣、郎利影、柴路、王清月、张志刚 2005 物理学报 **54** 5225]
 [7] Cheng Z X 1998 *Wavelet Analysis Algorithm and Application* (Xi ' an : Xi ' an Jiaotong University Press) p63 (in Chinese) [程正兴 1998 小波分析算法与应用 (西安 : 西安交通大学出版社) 第 63 页]

[8] Hu C H , Zhang J B , Xia J , Zhang W 2001 *System Analysis and Design Based on MATLAB—Wavelet Analysis* (Xi ' an : Xidian University Press) p18 (in Chinese) [胡昌华、张军波、夏军、张伟 2001 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析 (西安 : 西安电子科技大学出版社) 第 18 页]
 [9] Zou M Y 2004 *Deconvolution and Signal Recovery* (Beijing : National Defence Industry Press) p94 (in Chinese) [邹谋炎 2004 反卷积和信号复原 (北京 : 国防工业出版社) 第 94 页]
 [10] Gubanov V S 1997 *Generalized Least-squares. " Theory and Application in Astrometry "* S-Petersburg (in Russian) p318
 [11] Alexander E R 2006 *Chin. J. Astron. Astrophys* **6** 157
 [12] Shen F L , Ye Z F , Qian Y M 2002 *Signal Statistic Analysis and Process* (Hefei : University of Science and Technology China Press) p55 (in Chinese) [沈凤麟、叶中付、钱玉美 2002 信号统计分析 & 处理 (合肥 : 中国科学技术大学出版社) 第 55 页]
 [13] Kaspi V M , Taylor J H , Ryba M F 1994 *APJ* **428** 713

Use of wiener filtration in wavelet domain in ensemble pulsar time algorithm

Zhong Chong-Xia^{1) 2) †} Yang Ting-Gao²⁾

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

2) *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3) *Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China*

(Received 18 December 2006 ; revised manuscript received 16 March 2007)

Abstract

Pulsars rotate extremely stably, they can be used as time standard. However, pulsar time defined by single pulsar is influenced by several noise resources. To weaken these influences to get a more stable time scale, one can take ensemble analysis to obtain the ensemble pulsar time. Since different pulsars have different rotation frequency, and the noise source have different influence on different frequency of each pulsar, we can apply wavelet analysis to integrate the pulsar time, and this algorithm can take consideration of the long-term and short-term stability of pulsar time. On the other hand, the pulsar timing residuals are caused by reference atomic clock and pulsar itself, so we can apply Wiener filtration analysis to distinguish the two parts, and then calculate the ensemble pulsar time with the residuals after removing the error of reference atomic clock. Based on both of the two algorithms, a new algorithm of Wiener filtration in wavelet domain has been presented, which combines the merits of wavelet analysis and Wiener filtration and can remove the noise influence to pulsar time more effectively. Experimental results prove that Wiener filtration in wavelet domain can reduce noise influence of pulsar timing residuals effectively.

Keywords : ensemble pulsar time, wavelet analysis, Wiener filtration, Wiener filtration in wavelet domain

PACC : 9760G, 9575, 9575M