

# 一种基于小波相关滤波的无线电干涉测量处理方法

路伟涛<sup>1,2</sup>, 任天鹏<sup>1,2</sup>, 陈略<sup>1,2</sup>, 韩松涛<sup>1,2</sup>, 王美<sup>1,2</sup>

(1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 2. 航天飞行动力学技术国家级重点实验室, 北京 100094)

**摘要:** 针对深空探测中干涉测量微弱信号相关处理问题, 提出了一种基于小波滤波的无线电干涉测量方法。首先, 在小波相关滤波算法分析的基础上, 提出了基于移位相关、逆序处理以及最高层小波系数阈值处理的改进算法; 其次, 分析并构建了深空探测宽带信号模型, 并给出了基于小波相关滤波的无线电测量方案; 最后通过蒙特卡洛仿真和实测数据处理证明小波相关滤波可以改善无线电干涉测量精度, 其中同步卫星群时延估计精度改善约10%。

**关键词:** 深空探测; 无线电干涉测量; 小波相关滤波; 移位相关

**中图分类号:** TN98

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2019)01-0082-06

**DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.01.012

**引用格式:** 路伟涛, 任天鹏, 陈略, 等. 一种基于小波相关滤波的无线电干涉测量处理方法[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 82-87.

**Reference format:** LU W T, REN T P, CHEN L, et al. A radio interferometry processing method based on wavelet correlation filter[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(1): 82-87.

## 引言

无线电干涉测量技术具有测量精度高、作用距离远等优点, 在深空探测任务中得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。但是航天测控信号特别是深空探测信号的发射功率有限, 传播路径较长, 测站接收的信号比较微弱, 同时信道环境多变、测控设备复杂, 限制了VLBI的测量精度<sup>[3-4]</sup>。通过增大基线长度、处理带宽以及接收天线口径、改善低噪放大器等途径可以在一定程度上提高系统的测量性能<sup>[5]</sup>, 但代价较高。如接收天线口径增加一倍, 接收信号信噪比约提高3 dB, 但耗费增加却不止一倍; 基线长度的增大受限于地球尺度<sup>[6]</sup>。

随着计算机技术的发展和信号处理算法的研究, 从数据处理层面改善航天测控系统性能, 是一种性价比相对可观的改进方案<sup>[7]</sup>, 其中信号滤波是一种改善信号质量常用的处理手段<sup>[8]</sup>。小波变换以其多分辨率和紧至性在信号滤波处理中得到了广泛研究和应用<sup>[9-10]</sup>, 现有小波滤波方法可大致分为3类: 小波阈值滤波<sup>[11]</sup>、模极大值滤波<sup>[12]</sup>和小波相关滤波。考虑到航天测控信号和上述3类滤波算法的特点, 小波相关滤波算法更适合处理航天测控信号。小波相关滤波最早由Within提出<sup>[13]</sup>, Xu等人提出了一种基于空域相关性的噪声去除方法(Spatially Selective Noise Filtration, SSNF)<sup>[14]</sup>, 其基本原理就是利用信号与噪声的小波

系数在相邻尺度间的相关性不同进行滤波。在该算法中噪声功率的估计关系到各尺度上阈值的设定, Pan等人给出了噪声功率阈值的理论计算公式, 并给出了一种估计信号噪声方差的有效方法, 使得小波相关滤波算法具有自适应性<sup>[15]</sup>。小波相关滤波存在以下两个问题。

1) 小波系数在各尺度间的微小偏移降低了尺度间相关性和滤波性能。针对该问题, 区域相关算法<sup>[16]</sup>、重复相关算法<sup>[13]</sup>、降低分解层数<sup>[17]</sup>等措施相继被提出和研究, 但效果并不理想。

2) 小波系数处理从低尺度向高尺度进行限制了滤波效果<sup>[18]</sup>。文献[19]利用尺度间归一化相关系数进行重构, 增强了信号, 抑制了噪声, 但滤波性能改善有限; 文献[19]将小波阈值滤波与小波尺度滤波结合, 算法比较复杂; 文献[17]提出了由高层向低层的逆序处理思路, 但在具体算法中未能体现。

针对小波相关滤波的上述两个问题, 文献[20]提出了一种基于移位相关的小波相关滤波算法, 取得了较好的宽带信号滤波效果。本文首先简要论述了小波相关滤波算法原理, 然后对航天测控宽带信号进行建模, 在分析无线电干涉测量原理的基础上, 提出了基于小波滤波的无线电干涉测量方案, 最后利用实测数据进行了验证。

# 1 基于移位相关的小波相关滤波算法

## 1.1 小波相关滤波算法

相邻尺度间小波系数相关值定义

$$Cor_l(m, n) = \prod_{j=0}^{l-1} W(m+j, n) \quad (1)$$

其中： $m$ 、 $l$ 、 $n$ 分别为待求相关系数尺度、尺度数目及小波系数的个数， $W(m, n)$ 为尺度 $m$ 上的第 $n$ 个小波系数，一般取 $l=2$ ，记为 $Cor_2(m, n)$ 。需要对相关系数进行能量归一化

$$Cor_{2R}(m, n) = Cor_2(m, n) \sqrt{\frac{PW(m, n)}{PCor_2(m, n)}} \quad (2)$$

其中： $PW(m, n) = \sum_{n=1}^N W^2(m, n)$ ， $PCor_2(m, n) = \sum_{n=1}^N Cor_2^2(m, n)$ 。

小波相关滤波算法步骤如下：

1) 初始化解层数 $m = Lev$ ，滤波后的小波系数 $W_F(m, n)$ 为零，对信号进行平稳小波变换；

2) 按照式(1)和式(2)求得 $m$ 层小波系数的归一化相关值；

3) 对 $m$ 层所有小波系数 $W(m, n)$ ， $n=1, \dots, N$ 进行判断筛选。若 $|Cor_{2R}(m, n)| \geq |W(m, n)|$ ，则认为该点的小波系数由信号引发，该系数被保留至 $W_F(m, n)$ ，并置零 $W(m, n)$ ；反之，则认为该点由噪声产生。

4) 重复步骤2)和3)直到 $W(m, n)$ 的功率小于设定的阈值。

5) 对所有分解层数进行步骤2)~4)的处理，得到滤波后的小波系数 $W_F(m, n)$ ，进行逆小波变换得到滤波后的信号。

算法的关键在于第2)步中相关值的求解和第4)步中阈值的设定，其中阈值的设定可参考文献[17, 21]，相关值的求解受到小波系数在各分解层间偏移的影响，下面对该问题进行解决。

## 1.2 小波相关滤波改进算法

### 1) 移位相关处理

小波系数在各尺度间存在微小偏移，对小波系数尺度间的相关性产生影响，进而影响小波系数的筛选，最终影响滤波性能。分解层数越高，该偏移就越大；这种偏移与小波函数也有关系。

考虑到消失矩阶数和支撑长度在滤波算法中的影响<sup>[20]</sup>，选择db1小波进行小波分解，并通过理论推导给出了各层小波系数偏移量与分解层数的关系，以此解

决偏移对相关系数带来的影响。

假设信号 $s(k)$ ， $k=1, \dots, N$ 为由 $\pm 1$ 组成的序列，假设在 $k=k_{0,p}$ 处存在极性转换，即在 $k=k_{0,p}$ 附近的邻域 $[k_{0,p}-L, k_{0,p}+L]$ ， $L \in \mathbb{N}$ 内存在如下关系

$$\begin{cases} s(k) = s(k_{0,p}), k_{0,p}-L \leq k \leq k_{0,p} \\ s(k) = -s(k_{0,p}), k_{0,p} < k \leq k_{0,p}+L \end{cases} \quad (3)$$

设 $s(k)$ 第 $j$ 层细节系数的某一峰值点位于 $k_{j,\text{peak}}$ ，第 $j+1$ 层细节系数与此相对应的峰值点位于 $k_{j+1,\text{peak}}$ ，则满足

$$k_{j+1,\text{peak}} = k_{j,\text{peak}} - 2^{j-1} \quad (4)$$

详细证明参见文献[22]。

### 2) 低尺度小波系数处理

考虑到信号的小波系数在小波分解过程中逐渐增强，而噪声的小波系数则迅速减弱，那么可以认为在高分解层信号小波系数占绝对优势，高分解层间的相关结果中信号也占绝对优势，即随着分解层数的增加信号相关性增强。所以相关尺度滤波应从高尺度向低尺度逆向处理。

考虑到信号小波系数扩散现象<sup>[21]</sup>，当进行相关处理时，高分解层中被认为噪声的位置，在低分解层也必然为噪声。由此可以由高尺度处理结果向低尺度提供约束。另外，在提供约束时必须考虑小波系数在各层间的偏移量，避免将低尺度小波系数错误置零。

(1) 遍历 $m$  ( $m = Lev, \dots, 2$ )层小波系数，得到等于零的位置 $index_{\text{IsZero}}$ 和不等于零的位置 $index_{\text{IsNonZero}}$ ；

(2) 利用前文小波系数在各层间的偏移量和 $index_{\text{IsNonZero}}$ ，修正 $index_{\text{IsZero}}$ ，得到 $index'_{\text{IsZero}}$ ；

(3) 置零 $m-1$ 层 $index'_{\text{IsZero}}$ 位置的小波系数。

低尺度小波系数处理通过两个方面进行改进：由高层向低层逆向处理，并由高层处理结果向低层处理结果提供约束。

### 3) 高尺度小波系数阈值处理

由于高斯噪声经过小波变换后仍为高斯噪声，同样满足统计规律中的 $3\sigma$ 准则。随着分解层数的增加，在高尺度小波系数中，信号占主导作用，噪声被大幅度抑制，所以这里选择硬阈值法进行处理

$$\hat{W}(Lev, m) = \begin{cases} W(Lev, m), & |W(Lev, m)| \geq Thr \\ 0, & |W(Lev, m)| < Thr \end{cases} \quad (5)$$

其中： $Lev$ 为小波分解的最高层数； $Thr = c \cdot \sigma$ 为阈值； $c$ 为常数，为了避免错误置零小波系数，这里选择 $c=2.5$ ； $\sigma$ 为 $Lev$ 层小波系数的标准差。至此，可以给出改进的小波相关滤波算法：

(1) 按照传统小波相关滤波算法进行处理, 得到滤波后的小波系数  $W_F(m, n)$ , 其中尺度间相关系数通过移位相关算法计算;

(2) 对最高层小波系数  $W_F(Lev, n)$  进行阈值处理, 并更新  $W_F(Lev, n)$  中的最高层小波系数, 记为  $W'_F(m, n)$ ;

(3) 从  $W'_F(m, n)$  的高尺度系数向低尺度系数提供约束, 继续处理  $Lev-1$  层, 直至处理所有分解层。

## 2 基于小波相关滤波的无线电测量方案

### 2.1 宽带航天测控信号模型

无线电干涉测量只需接收航天器的下行信号, 对信号类型没有明确要求。目前干涉测量试验中可接收航天器下行信号类型主要包括扩频信号、数传信号、遥测信号等。上述信号可统一由式(6)建模

$$s(t) = \sqrt{2P}C(t)D(t)\cos(2\pi f_c t + \varphi_0) \otimes h(t) \quad (6)$$

其中:  $f_c$  为信号载波频率;  $C(t)$  是直接序列扩频码(若非扩频信号, 则取值为1);  $D(t)$  是宽带数传信号或遥测信号等;  $P$  是信号功率;  $\varphi_0$  是载波信号初相;  $h(t)$  为带限滤波器;  $\otimes$  表示卷积。

### 2.2 基于小波相关滤波的群时延估计方法

无线电干涉测量中, 宽带信号的群时延估计一般采用FX型相关处理实现。其一般处理流程是在一定时延预测模型的基础上, 在数据读取过程中进行整数比特延迟的补偿, 然后做条纹反转降低条纹率, 接着在频域做小数比特补偿, 最后求取互功率谱, 通过对功率谱相位拟合得到时延和条纹率的估计值<sup>[22]</sup>, 处理流程如图1所示。

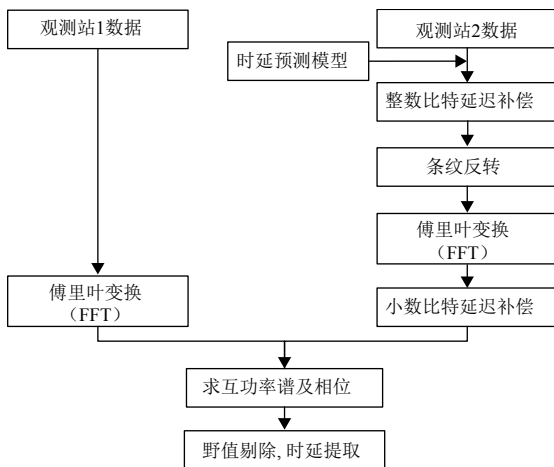


图1 FX宽带相关处理流程图

Fig. 1 The FX correlation scheme of wide band signal

设经过上述处理过程后两测站接收数据的频域表达为  $F_1(\omega)$ 、 $F_2(\omega)$ , 最后可得两测站信号互谱

$$S(\omega) = F_1(\omega)F_2^*(\omega) = A \exp(j\phi(t, \omega)) \quad (7)$$

其中:  $A = |F_1(\omega)|^2$ ;  $\phi(t, \omega)$  为互谱的相位。那么可得剩余时延  $\Delta\tau_g$

$$\Delta\tau_g = \frac{\partial\phi(t, \omega)}{\partial\omega} \quad (8)$$

由式(8)可以知道, 通过相对频率的拟合即可得到剩余时延。考虑到噪声的存在, 公式(7)改写为

$$S(\omega) = [F_1(\omega) + N_1(\omega)][F_2(\omega) + N_2(\omega)]^* = A \exp(j\phi(t, \omega)) + B \exp(j\phi_n(t, \omega)) \quad (9)$$

其中:  $B \exp(j\phi_n(t, \omega))$  是3项含有噪声的频谱表达式。高斯噪声的频谱具有随机性, 其相位也是随机的<sup>[23]</sup>, 必然给式(8)中残余时延的求解带来误差。基于此, 提出了基于小波相关滤波的群时延估计方案, 如图2所示。两个测站接收的宽带信号首先进行小波滤波, 再进行FX宽带相关处理, 最后进行群时延估计。

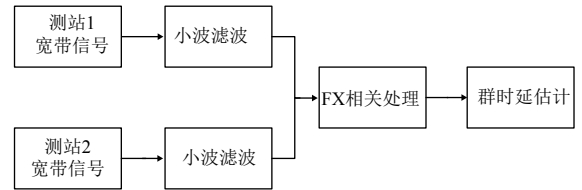


图2 基于小波相关滤波的群时延估计方案

Fig. 2 The group delay estimation scheme based on wavelet correlation filter

## 3 试验验证与分析

### 3.1 仿真分析

假设采样频率为56 MHz, 扩频信号码速率为1.023 MHz, 信号带宽为2倍码速率; 信号数据长度为4 096。图3给出了信号在信噪比为10 dB时含噪信号、滤波信号的时域波形对比(分解层数为4)。其中, “理想”表示为理想无噪声信号, 作为滤波效果对比; “含噪”表示理想信号叠加噪声后的信号, 为滤波处理的输入信号; “SSNF”表示传统小波空间滤波算法; “mySSNF”表示本文提出的改善小波空间滤波算法; 下同。可以看出, 经过滤波处理后, 信号噪声均被明显抑制; 相对传统滤波算法, 改进算法滤波信号的残留“毛刺”相对较少, 说明滤波性能更好。

以信噪比改善  $SNR_{imp}$  和相对误差  $R_{ms}$  为指标, 如式(10)所示, 考察传统相关滤波和改进算法的滤波性能。

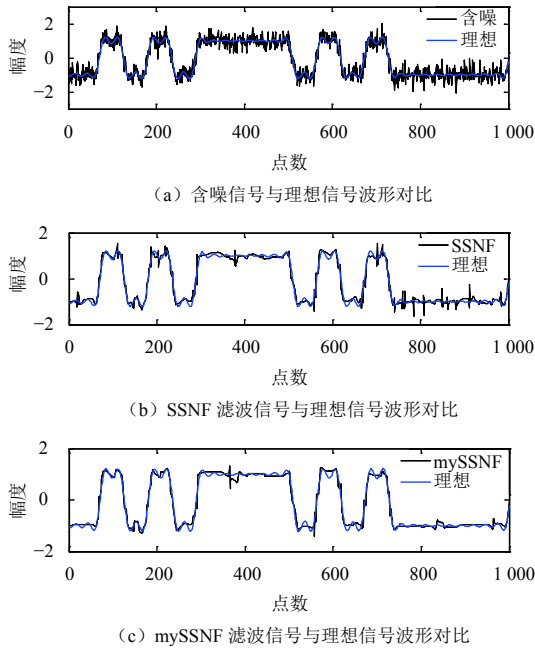


图 3 传统相关滤波与改进相关滤波后时域波形对比 (SNR = 10 dB)  
Fig. 3 The time domain comparison after processing by SSNF and mySSNF (SNR = 10 dB)

$$SNR_{imp} = 10 \log_{10} \frac{\sum x_0^2}{\sum (x_F - x_0)^2} - SNR_{in},$$

$$R_{ms} = \sqrt{\frac{\sum (x_F - x_0)^2}{\sum x_0^2}} \quad (10)$$

图 4 给出了不同噪声情况下，传统相关滤波和改进算法对带限扩频信号质量的改善情况（500次蒙特卡罗仿真）。由图 4 可以看出，经滤波处理后信号质量有所改善，低信噪比改善幅度大于高信噪比情况；改

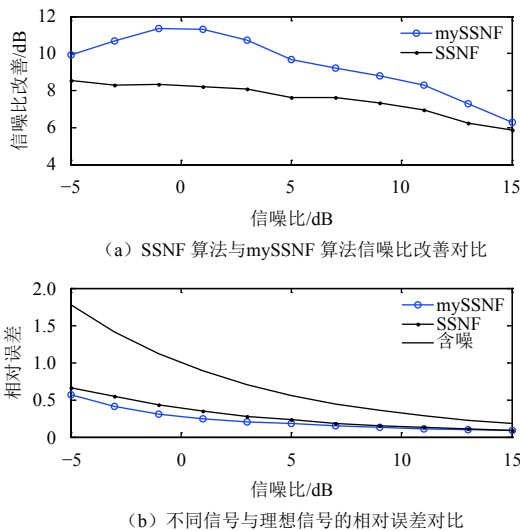


图 4 传统相关滤波与改进相关滤波信噪比改善对比  
Fig. 4 The comparison of SNR improvement after processing by SSNF and mySSNF

进算法滤波处理后信号质量改善幅度较传统算法稍高，信噪比改善幅度在低信噪比时约高 2 dB，在高信噪比时约高 1 dB；相对误差存在类似趋势。图 3、图 4 的仿真结果说明了改进滤波算法相对更加有效，所以后续处理中仅采用改进算法。

假设采样频率为 56 MHz，信号时延真值为  $51T_s$ （采样周期），信号处理积分时间约为 2.3 ms；小波分解层数为 4，小波函数为 db1。图 5 给出了滤波前后不同信噪比下群时延估计性能（蒙特卡罗仿真 500 次）。由图 5 (a) 可以看出滤波前后群时延估计均值基本一致，滤波后群时延估计抖动相对较小；由图 5 (b) 可以看出滤波后群时延估计误差有所降低，改善幅度如表 1 所示，可以看出滤波后群时延估计误差改善幅度最大约 30%，最差约 7%。图 5 和表 1 表明经过小波相关滤波后，群时延估计性能有一定程度的提高。

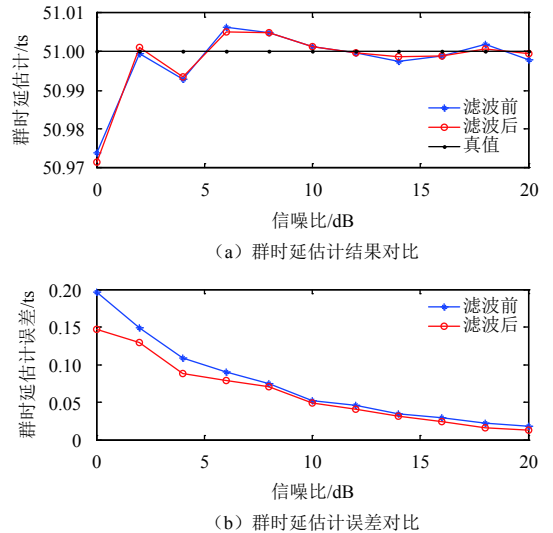


图 5 mySSNF 算法滤波前后群时延估计性能对比  
Fig. 5 The comparison of group delay accuracy after processing by mySSNF

表 1 滤波前后群时延估计误差改善  
Table 1 The improvement of group delay accuracy after processing by mySSNF

信噪比/dB	0	6	10	16	20
精度改善/%	25.46	12.09	6.69	17.73	30.15

### 3.2 实测数据处理

实测数据为某同步卫星于 2013 年发射的 S 频段扩频测控信号，采样频率为 56 MHz，宽带信号主瓣位于 16~25 MHz 之间，带宽约为 9 MHz；考虑到信号相对幅度，拟合频率区间选为 [17.5 23.5] MHz，约 6 MHz；读取 50 段数据，每段数据时长与积分时间相等。当积分时间为 9.4 ms 时，图 6 给出了滤波前后群时延估计结果。

可以看出,经过滤波后,群时延估计抖动稍有减弱。

不同积分时间下滤波前后群时延估计均值和误差如表2所示,可以看出,滤波处理后,群时延估计精度改善约10%,这与仿真信号的改善程度相当。

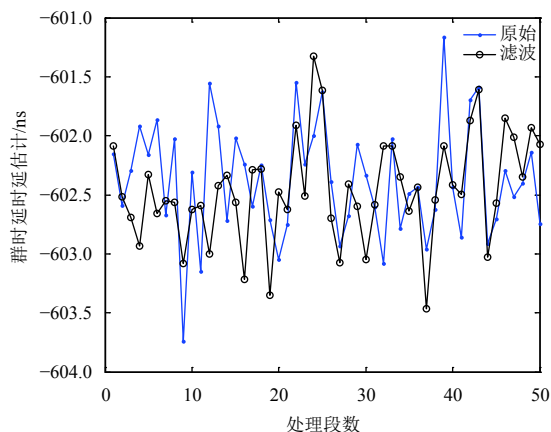


图6 滤波前后群时延估计结果(积分时间9.4 ms)

Fig. 6 The comparison of group delay accuracy after processing by mySSNF (Integration time is 9.4 ms)

表2 滤波前后实测数据群时延估计对比

Table 2 The comparison of group delay estimation without and with processing by mySSNF

积分时间/ms	滤波前均值/误差/ns	滤波后均值/误差/ns	误差改善/%
2.3	602.352 6 0.969 7	602.695 6 0.807 3	16.742 7
4.7	602.321 2 0.687 9	602.545 1 0.622 1	9.565 7
9.4	602.379 6 0.490 2	602.457 0 0.445 2	9.175 8
18.7	602.345 3 0.327 5	602.601 7 0.292 1	10.808 1
37.4	602.311 7 0.233 5	602.500 1 0.216 9	7.119 2

## 4 结论

本文针对深空探测中干涉测量微弱信号相关处理问题,提出了一种基于小波滤波的无线电干涉测量方法。首先,分析指出传统小波相关滤波算法存在小波系数在各尺度间的微小偏移降低滤波性能、低尺度小波系数易受噪声影响等问题,提出了基于移位相关、逆序处理以及最高层小波系数阈值处理的改进算法。其次,分析并构建了深空探测宽带信号模型,并给出了基于小波相关滤波的无线电测量方案,最后通过蒙特卡洛仿真和某同步卫星实测数据处理证明小波相关滤波可以改善无线电干涉测量精度。

## 参 考 文 献

[1] 魏二虎,史青,严书,等. ERP精度对“嫦娥一号”差分VLBI定位精度的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(11):1324-1327.  
WEI E H, SHI Q, YAN W, et al. Influence of ERP's precision on CE-1's positioning based on differential VLBI[J]. Geomatics and

Information Science of Wuhan University, 2011, 36(11): 1324-1327.

- [2] 唐歌实,韩松涛,陈略,等. 深空网干涉测量技术在“嫦娥3号”任务中应用分析[J]. 深空探测学报,2014,1(2):146-149.  
TANG G S, HAN S T, CHEN L, et al. Analysis on interferometric tracking technology by China deep space network in the Chang'e-3 mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(2): 146-149.
- [3] 孙靖,王美,平劲松. 利用VLBI技术进行深空航天器跟踪的仿真分析[J]. 深空探测学报,2014,1(3):226-229.  
SUN J, WANG M, PING J S. Simulations models and analyses on VLBI spacecraft tracking[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(3): 226-229.
- [4] 韩松涛,唐歌实,曹建峰,等. 面向“CE-3号”软着陆过程的深空网干涉测量技术[J]. 深空探测学报,2015,2(2):120-124.  
HAN S T, TANG G S, CAO J F, et al. Application of interferometric tracking by China DSN in CE-3 soft landing[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(2): 120-124.
- [5] 朱新颖,李春来,张洪波. 深空探测VLBI技术综述及我国的现状和发展[J]. 宇航学报,2010,31(8):1893-1899.  
ZHU X Y, LI C L, ZHANG H B. A survey of VLBI technique for deep space exploration and trend in China current situation and development[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 1893-1899.
- [6] KARDASHEV N S, KOVALEV Y Y, KELLERMANN K I. Radio astron: an Earth-space radio interferometer with a 350,000 km baseline[J]. The Radio Science Bulletin, 2012, 343: 1-16.
- [7] 路伟涛,杨文革,洪家财,等. FX型相关处理方案及野值剔除算法[J]. 中国空间科学技术,2012,32(6):54-61.  
LU W T, YANG W G, HONG J C, et al. FX correlation scheme and improvement on delete algorithm[J]. Chinese Space Science and Technology, 2012, 32(6): 54-61.
- [8] HU Y G, ZHOU J J, TANG J, et al. The application of complex wavelet transform to spectral signals background deduction[J]. Chromatographia, 2013.
- [9] 孟晋丽,潘泉,张洪才. 基于相邻尺度积系数的半软阈值小波滤波[J]. 电子与信息学报,2007,29(7):1649-1652.  
MENG J L, PAN Q, ZHANG H C. Denoising by multiscale product coefficient semi-soft thresholding[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(7): 1649-1652.
- [10] YU L M, WHITE L B. Thresholding strategy in passive detection via wavelet filter banks [C]//2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering(CSAE). Zhangjiajie, China[s.n.]:2012:387-391.
- [11] 苏哲,许录平,王勇,等. 改进小波空域相关滤波的脉冲星微弱信号降噪[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(12):2500-2506.  
SU Z, XU L P, WANG Y, et al. Pulsar weak signal denoising based on improved wavelet spatial correlation filtering[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2500-2506.
- [12] 潘泉,孟晋丽,张磊,等. 小波滤波方法及应用[J]. 电子与信息学报,2007,29(1):236-242.  
PAN Q, MENG J L, ZHANG L, et al. Wavelet filtering method and its application[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(1): 236-242.
- [13] WITHKIN A P. Scale space filtering [EB/OL]. [2017-10-20]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.81.118&rep=rep1&typepdf>.
- [14] XU Y S, WEAVER J B, HEALY D M, et al. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1994, 3(6): 747-758.

- [15] PAN Q, ZHANG L, DAI G Z, et al. Two denoising methods by wavelet transform[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 1999, 47(12): 3401-3406.
- [16] 赵瑞珍, 屈汉章, 宋国乡. 基于小波系数区域相关性的阈值滤波算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2001, 28(3): 324-327.  
ZHAO R Z, QU H Z, SONG G X. A threshold filtering algorithm based on the region relativity of the wavelet coefficients[J]. Journal of Xidian University, 2001, 28(3): 324-327.
- [17] 王敏君, 熊邦书, 黄丽贞, 等. 基于小波尺度相关的图像清晰度判别方法[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(8): 164-167.  
WANG M J, XIONG B S, HUANG L Z, et al. Image definition evaluation method based on wavelet scale correlation[J]. Computer Systems & Applications, 2010, 19(8): 164-167.
- [18] ZHANG L, BAO P. Denoising by spatial correlation thresholding[J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(6): 535-538.
- [19] 祝传广, 邓喀中, 范洪冬. 基于尺度空间相关的自适应小波滤波算法研究[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2012, 28(3): 32-37.  
ZHU C G, DENG K Z, FAN H D. Adaptive wavelet threshold for signal denoising based on the scale space correlation[J]. Journal of Suzhou University Natural Science Edition, 2012, 28(3): 32-37.
- [20] 路伟涛, 杨文革, 洪家财. 改进的小波空域相关滤波算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(3): 1005-1011.
- LU W T, YANG W G, HONG J C. Improved spatially selective noise filtration algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2015, 45(3): 1005-1011.
- [21] 向东阳, 吴正国, 胡文彪, 等. 改进的小波变换系数相关去噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(5): 561-565.  
XIANG D Y, WU Z G, HU W B, et al. Improved denoising algorithm using correlation of wavelet coefficient[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2010, 30(5): 561-565.
- [22] SHU F C, ZHANG X, KONDO T. Development of correlator model for differential VLBI observations of satellites [C]// 2008 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, ICMMT2008 Proceeding. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2008.
- [23] 齐国清, 贾欣乐. 基于DFT相位的正弦波频率和初相的高精度估计方法[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1164-1167.  
QI G Q, JIA X L. High-accuracy frequency and phase estimation of single-tone based on phase of DFT[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1164-1167.
- 作者简介:  
**路伟涛**(1985-), 男, 助理研究员, 主要研究方向: 无线电干涉测量与深空探测。  
通信地址: 北京市5130信箱120分箱(100094)  
电话: 18910162302  
E-mail: looweitao@126.com

## A Radio Interferometry Processing Method Based on Wavelet Correlation Filter

LU Weitao<sup>1,2</sup>, REN Tianpeng<sup>1,2</sup>, CHEN Lue<sup>1,2</sup>, HAN Songtao<sup>1,2</sup>, WANG Mei<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

2. Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory, Beijing 100094, China)

**Abstract:** A radio interferometry method is proposed to resolve the problems of the process of weak spacecraft signal received in deep space exploration. Firstly, based on the analysis of the original wavelet correlation filter, an improved one is proposed which contains shift correlation, the processing order from higher scale to lower one and the threshold filtering of the highest scale coefficients. Secondly, the wide band signal model in deep space exploration is analyzed and constructed, and the radio interferometry scheme based on wavelet correlation filter is provided. Finally, results of Monte Carlo simulation and data processing for some GEO satellite measured signal prove a better performance of the interferometry measurement, and the group delay accuracy of the GEO satellite is improved by 10%.

**Key words:** space exploration; radio interferometry; wavelet correlation filter; shift correlation

### High lights:

- The shift correlation is used in the proposed filtration algorithm to overcome the degradation of wavelet coefficient correlation among adjacent wavelet scales, which enhances the filtration performance.
- Different from the traditional algorithm, the novel one processes the wavelet coefficient from higher scale to lower one, making full use of the reverse trend of the signal's and noise's wavelet coefficient, further improving the filtration performance.
- The proposed filtration algorithm processes the wavelet coefficient at the highest scale by Gaussian filter, improving the quality of the wavelet coefficient and depressing the noise influence of all the wavelet scales to improve the wavelet reconstruction performance and the quality of signal.
- The radio interferometry scheme based on wavelet correlation filter is provided, and the results of Monte Carlo simulation and data processing of some GEO satellite measured signal prove a better performance of the interferometry measurement.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]