

导向钻井下传信号 Haar 提升小波去噪研究

曾方^{1,3}, 唐斌^{1,2,3}, 梁颖^{1,3}, 张欣^{1,3}

(1. 成都航空职业技术学院 航空电子工程系, 成都 610100; 2. 电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731;
3. 四川省高校校企联合“航空电子技术”应用技术创新基地, 成都 610100)

摘要: 针对导向钻井下行通信中信号传输存在多种噪声的问题, 提出了一种基于多尺度 Haar 小波提升变换的信号去噪方法; 在分析变钻井液排量下行通信信号传输噪声特点的基础上, 给出了 Haar 小波的提升变换方案、信号去噪的原理及实现步骤, 利用 Haar 多尺度提升小波变换实现了对井下接收的由排量变化三降三升过程构成的下传信号的去噪处理; 对比实验结果表明, 该方法既能有效滤除噪声, 又能保持钻井液排量三降三升变化过程构成的下传信号其脉冲沿的位置和脉宽不失真, 保证了对下传信号的有效识别。

关键词: 导向钻井; 下行通讯; 钻井液脉冲; Haar 小波; 提升小波变换

Research of Haar Lifting Wavelet Signal Denoising on Downward Communication of Steering Drilling Tool by Drilling Fluid Displacement Changes

Zeng Fang^{1,3}, Tang Bin^{1,2,3}, Liang Ying^{1,3}, Zhang Xin^{1,3}

(1. Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China; 2. School of Electronic Engineering, UESTC, Chengdu 611731, China; 3. Innovation Base of School-Enterprise Cooperation Aviation Electronic Technology in Sichuan, Chengdu 610100, China)

Abstract: Considering a variety of noise problems in the downhole communication, denoising method based on Haar ascension wavelet transform is applied to process the downward command signal recognition. On the basis of analyzing of the transmission noise characteristics of drilling fluid flow signal, Haar wavelet lifting scheme, basic principle and implementation steps of signal de-noising were given. Signal denoising was achieved in the use of multi-scale Haar ascension wavelet transform in order to deal with the noises in the three down and three liters signal received on the underground. underground experiment results have proved the validity and feasibility of the method. Contrast experimental results show that the method can not only effectively filter out the noise, but can also maintain the position of pulses edge and pulse width without any distortion, to ensure the effective recognition of the downward signal.

Key words: steering drilling; downward communication; drilling fluid pulse; Haar wavelet; lifting scheme wavelet transform

0 引言

如果要进行导向钻井技术, 必须要依靠地面和井下工具的双向通信。其关键技术问题是, 井下接收装置对接收的指令信号的识别。旋转导向钻井井下信号传输是通过改变钻井液排量的方法实现指令下传的, 井下泥浆排量变化的值可以通过井下的涡轮电机在线检测, 并与接收装置的软硬件配合, 共同对钻井下传信号进行处理、识别和解释。此种技术结构简单和操作方便, 下传指令编码示意图如图 1 所示。用于检测井下泥浆涡轮电机输出的电压变化量可以用下传信号接收装置测得, 从而获得相应的下传指令字, 若噪声幅值较高, 即使是脉宽很窄, 也可能会对下传脉冲跳变沿判断及脉宽计时带来错误的结果^[1-2]。正确识别指令的关键在于对脉宽的有效确认, 尤其是对变化的脉冲产生的位置和时间点的确认。

用于泥浆信道 MWD 地面信号处理及去噪的方法很多, 有

收稿日期: 2014-01-16; 修回日期: 2014-03-21。

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2012M511919); 四川省教育厅重点项目(14ZA0307)。

作者简介: 曾方(1966-), 女, 四川成都人, 副教授, 主要从事电气控制及计算机技术的研究。

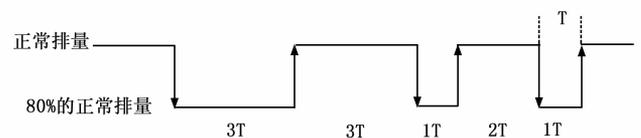


图 1 下传指令编码示意图

常规线性滤波方法, 非线性滤波方法^[3]及小波去噪法^[4-7]。但在旋转导向下传信号时, 接收装置井下且接近钻头, 微处理器处于的工作环境较差, 性能有限。所以下传接收装置中的数据滤波软件的算法应该编写得更加简单、可靠才会具有真正的实用性。综合考虑井下信号传输和噪声干扰的特点, 提出采用多尺度 Haar 小波提升变换实现对下传信号的去噪, 该方案特别适合对带有随机干扰的脉冲信号的提取。实验结果表明该方法可以有效地对采用变钻井液排量下传的指令信号进行去噪, 去噪后的信号能真实反映原始指令的三降三升脉冲沿的位置和脉宽的大小, 为井下还原下传指令提供有力帮助。

1 井下信号传输噪声分析

钻井作业时钻井液循环系统中影响下传信号的因素较多, 比较各类相关研究, 可以看出井下信号传输的噪声主要来源由两部分构成: 即钻具产生的噪声和钻井液井下传输带来的噪

声, 具体分析如下:

(1) 泥浆泵压缩泥浆引起的压力脉动是泥浆信道噪声的主要来源^[7]。泥浆泵正常工作时, 在立管上产生的噪声主要由活塞运行噪音和泵冲程噪音构成, 前较强, 后者较弱。都可以忽略不计。井下采集的信号是一个幅度较大的低频分量再加上高频噪声合成量, 其噪声频谱分布较宽, 是宽带白噪声。但噪声的幅度小于信号幅度。

(2) 其他噪声有: 钻盘旋转、钻头与地层界面的摩擦、钻杆谐振、立管晃动等机械作用造成的压力波动等, 这些噪声与泵噪声相比随机性很大、幅度较小、频带较宽, 可近似认为是白噪声, 与泵噪声和有用信号均无关系。

(3) 在井下导向工具中, 还有永磁式的交流泥浆涡轮发电机和力矩发生器。它们在工作中产生的强磁场会严重影响互感线圈检测到的信号。其有较明显的高频噪声, 还有一些低频, 甚至与信号基频相近的噪声, 这是最为棘手的问题之一。

在实际的导向钻井工程中, 泥浆排量变化信号持续时间有限, 而且钻井过程是时变的, 所发送的信号可能包含多种干扰或突变部分, 并且噪声也不是平稳的白噪声^[8]。传统的滤波降噪技术在降噪的同时也拓宽了信号波形, 平滑了信号中的尖峰突变成分, 损失突变点可能携带的重要信息, 而提升小波分析能够同时在时域和频域中对信号进行分析, 具有多分辨分析的功能^[9], 所以能在不同的分解层上有效地区分信号的突变部分和噪声, 从而实现信号的消噪, 既去掉了大部分噪声, 还不会导致明显的失真。这种处理过程应该去除各种尖峰脉冲、高频噪声和低频噪声, 识别信号和能提取信号。因此拟采用基于 Haar 小波的提升方案实现信号去噪, 该方案特别适合对带有随机干扰的井下脉冲信号的提取。

2 Haar 小波提升变换法

1994 年 Wim Sweldens 提出基于提升格式的小波变换, 被称为第二代小波变换, 这种新方法与传统小波的构造不同的是提升了格式小波变换不依赖于 Fourier 变换^[16-17], 完全在时空域完成了对双正交小波滤波器的构造。这种滤波器在计算速度、计算方法及计算结果上都更快、更简单、更准确; 对存储空间的要求也大大降低, 对多种采样方式, 如自适应、非线性、非奇异采以及整数到整数的变换均能较好地适应, 井下装置应用它更没有问题。

提升小波变换的运算速度高于传统小波变换, 二者相差近一倍。如果把双正交小波看成是正交小波的近似后的一个特例, 那么, Haar 小波的低通滤波器 $h(\omega)$ 和高通滤波器 $g(\omega)$ 可写成为^[10]:

$$h(\omega) = \tilde{h}(\omega) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}e^{-i\omega} \quad (1)$$

$$g(\omega) = \tilde{g}(\omega) = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}e^{-i\omega} \quad (2)$$

设 $c_{j,k}$ 为低通尺度系数, $d_{j,m}$ 为高通小波系数, 则提升小波变换定义为:

$$c_{j,k} = \sqrt{2} \sum_i \tilde{h}_{i-2k} c_{j+1,l} + \sum_m s_{k-m} d_{j,m} \quad (3)$$

$$d_{j,m} = \sqrt{2} \sum_i \tilde{g}_{i-2m} c_{j+1,l} \quad (4)$$

设 s 为提升函数, 取 $s(\omega) = -\frac{1}{8}e^{i\omega} + \frac{1}{8}e^{-i\omega}$, 则

$$\begin{aligned} \tilde{h}(\omega) &= \tilde{h}^0(\omega) + \tilde{g}(\omega) \overline{s(2\omega)} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}e^{-i\omega} - \\ &\frac{1}{16}e^{2i\omega} + \frac{1}{16}e^{i\omega} + \frac{1}{16}e^{-2i\omega} - \frac{1}{16}e^{-3i\omega} \end{aligned} \quad (5)$$

通过推导计算, 提升小波变换的近似尺度系数为

$$c_{j,k} = \frac{\sqrt{2}}{2}(c_{j+1,2k} + c_{j+1,2k+1}) + \frac{1}{8}(d_{j,k-1} - d_{j,k+1}) \quad (6)$$

而小波变换的近似尺度系数为

$$\begin{aligned} c_{j,k} &= \frac{\sqrt{2}}{16}(-c_{j+1,2k-2} + c_{j+1,2k} + \\ &8c_{j+1,2k+1} + c_{j+1,2k+2} - c_{j+1,2k+3}) \end{aligned} \quad (7)$$

可见式 (6) 的运算比式 (7) 少, 在实际操作中还可以用对称性减少计算, 加快速度。提升格式算法则是从一个较简单的多分辨分析出发, 利用尺度函数相同的多尺度二者关系, 逐步获得所需性质的多尺度。噪声主要分布在信号的高频段, 对其中的小波系数作收缩处理, 再利用收缩后的小波系数进行小波逆变换, 实现去噪声的目的。

3 多尺度 Haar 小波提升法去井下信号噪声实验

从井下提取的信号中含有各种噪音, 第一步是提升信号中的小波变换信号, 即将信号分解为新两种系数: 近似尺度系数 $c_{j,k}$ 和小波系数 $d_{j,m}$ 。第二步是将变换后的小波系数进行阈值收缩; 收缩后的小波系数和尺度系数二者被合成后, 从而形成去噪声后的信号。对某次井下接收的涡轮电机检测的下传指令信号进行去噪声处理波形如图 2 所示。

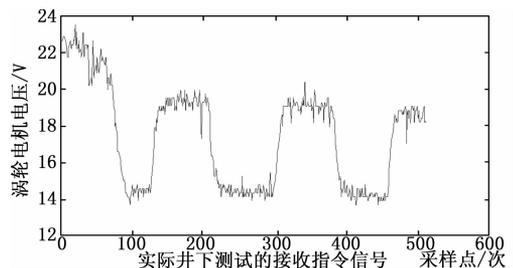


图 2 井下接收的下传指令信号

为了验证算法的滤波效果, 在 Matlab 环境下进行仿真分析。仿真实验中均采用软阈值方法。符合一般性原则, 阈值的选取采用“启发式阈值选择方法 (heursure)”进行处理, 该方法的性能良好, 并且应用较为广泛。

图 3 所示是一组井下下传指令信号, 分别采用的是 Haar 提升小波、DB5 (Daubechies 5) 提升小波和 Haar 小波去噪进行对比, 去噪效果如图 3 所示。图 4 为 Haar 小波提升法去噪所提取的小波系数, 图 5 为 Haar 提升小波、DB5 提升小波和 Haar 小波去噪后与原信号的差值, 明显可以看出, 用 Haar 小波提升法去噪后的误差大大减小。

从图 3 中可以直观地看出, 基于 Haar 提升格式的小波法滤除井下下传信号中的噪声较之 DB5 提升小波、Haar 小波取得更为显著的效果, 不仅能有效地抑制实际检测的下传信号中包含的白噪声和尖脉冲, 而且提供了强噪声背景下有效信号的突变位置, 即该方法在提高信噪比的同时,

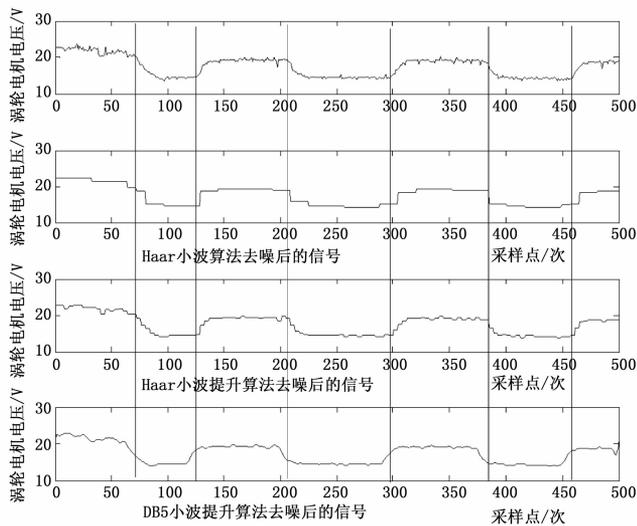


图 3 Haar 小波、Haar 提升小波、DB5 提升小波去噪对比

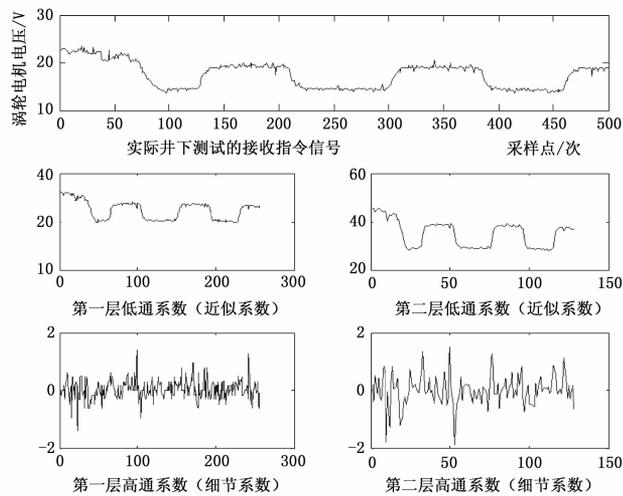


图 4 Haar 小波提升法所提取的小波系数

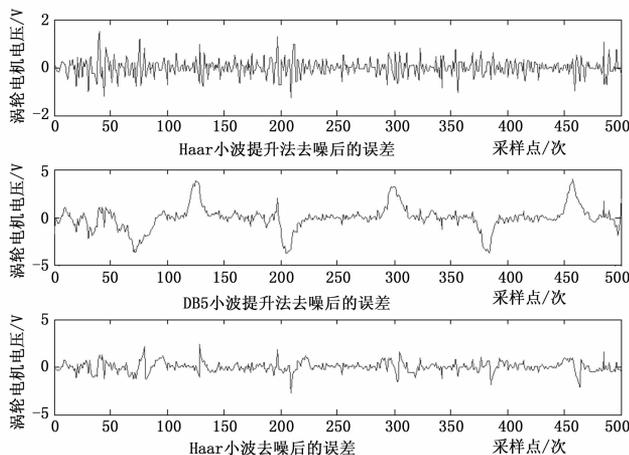


图 5 Haar 小波、Haar 小波提升法、DB5 小波提升法去噪误差对比

还在时间（或位置）上保持了较高的分辨率，不改变三降三升信号脉冲沿的位置和脉宽，为进一步识别下传指令脉

宽创造了条件。而 DB5 提升小波和 Haar 小波尽管也能滤除噪声，信号较为光滑，但是三降三升脉冲沿位置和脉宽失真较为严重，去噪后无法还原出实际下传指令的脉宽，无法有效识别真实的下传指令。

实验中的各种小波算法的信噪比（SNR）与均方根误差（MSE）的比较如表 1 所示。

表 1 各种小波算法的 SNR 和 MSE 比较

小波算法	SNR	MSE
Haar 小波提升	33.965 8	-4.517 7
DB5 小波提升	15.527 9	4.639 4
Haar 小波	29.939 4	-2.507 6

从表 1 中的 SNR 和 MSE 参数也可以看出，Haar 小波提升算法 SNR 最大，MSE 最小，所以选择这种去噪方法是最好的。

4 结束语

采用 Haar 小波的提升方案实现了对下传钻井液脉冲信号的去噪。仿真结果表明基于 Haar 提升格式的小波方法滤除井下下传信号中的噪声较之 DB5 提升小波、Haar 小波具有更显著的效果，不仅能有效地抑制白噪声和尖脉冲，而且提供了强噪声背景下有效信号的突变位置，即该方法在提高信噪比的同时，还在时间（或位置）上保持了较高的分辨率，为后续的信号脉宽的识别提供了有力保证。

参考文献:

- [1] 汤楠, 汪跃龙, 霍爱清, 等. 基于信号相似性的导向钻井下传信号处理方法 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39 (1): 111-117.
- [2] 赵琦, 霍爱清, 汤楠. 基于井下涡轮电机的导向钻井工具下传指令接收软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (12): 2898-2900.
- [3] 赵建辉, 王丽艳, 盛利民. 去除随钻测量信号中噪声及干扰的新方法 [J]. 石油学报, 2008, Vol. 29 (4): 596-600.
- [4] 刘正平, 冯召勇, 杨卫平. 基于小波去噪的微弱信号提取 [J]. 制造业自动化, 2010, 32 (8): 98-101.
- [5] 张伟, 师奕兵, 卢涛. 无线随钻泥浆信号小波包去噪处理 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24 (1): 80-84.
- [6] 张维强, 宋国乡. 基于一种新的阈值函数的小波域信号去噪 [J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31 (2): 296-303.
- [7] 李宏, 方世辉, 李族, 等. 泥浆脉冲信号的小波检测方法研究及应用 [J]. 长江大学学报 (自然科学版), 2010, 7 (1): 68-71.
- [8] 郭建军, 刘海军, 权景明. 无线随钻系统噪声信号分析与控制 [J]. 石油矿场机械, 2008, 37 (9): 10-13.
- [9] Brani Vidakovic. Statistical modeling by wavelet [M]. New York: John Wiley & Sons. 1999: 5-36.
- [10] Gao G C, Fang J, Xiong K, et al. Study on optimal adaptive update filter based on lifting scheme wavelet transform [A]. Computer Network and Multimedia Technology. CNMT 2009 [C]. Wuhan, 2009: 1-4.