

文章编号:1673-5005(2009)02-0058-05

# V 系统在随钻声波测井数据降噪中的应用

肖红兵<sup>1,2</sup>, 杨锦舟<sup>2</sup>, 鞠晓东<sup>1</sup>, 乔文孝<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 胜利油田 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

**摘要:**针对随钻声波测井过程中各种噪声干扰造成声波信号失真的问题,提出了使用线性V系统的降噪方法。首先,通过V系统变换将声波测井信号变换到频率域,然后去除其高频分量,再通过V系统反变换获得降噪后的信号。由于V系统是在 $L_2[0,1]$ 空间上的分段线性完备正交函数系,并且具有多分辨性质,所以V系统降噪相比经典的小波降噪有更好的效果。试验结果表明,该方法能够获得较好的降噪信号。

**关键词:**随钻声波测井; V系统; 降噪

**中图分类号:**P 631.83 **文献标识码:**A

## Application of V-system in acoustic logging while drilling data denoising

XIAO Hong-bing<sup>1,2</sup>, YANG Jin-zhou<sup>2</sup>, JU Xiao-dong<sup>1</sup>, QIAO Wen-xiao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Drilling Technology Research Institute, Shengli Oilfield, Dongying 257017, China)

**Abstract:** For acoustic signal distortion problems caused by a variety of noises in acoustic logging while drilling (LWD), a denoising method by using a linear V-system was proposed. First, acoustic logging signals are transformed to frequency domain by V-system, and its high-frequency components are removed, then the signals after noise reduction are reconstructed by the inverse V-system transform. V-system is a class of complete orthogonal function system on  $L_2[0, 1]$ , and it is multi-resolution. So the linear discrete V-system transform (DVT) is better than traditional wavelet transform. The test results show that relatively good denoising signals can be obtained by linear DVT.

**Key words:** acoustic logging while drilling; V-system; denoising

随钻声波测井技术是进行地层对比、地层评价以及储层描述的有效手段之一,可以在钻井的同时测量地层的纵、横波波速,不仅可提供地层孔隙度、通过实时地层压力预测提高钻井安全系数、通过与地震资料结合降低地球物理勘探风险和地质导向效率,还能进行岩石机械特性分析及钻井事故预测。但是,噪声是影响随钻声波测井信息获取的一个重要因素,噪声的干扰,极大地影响了随钻声波信号的质量,进而影响到测井解释的正确度。因此,降噪是随钻声波测井信号处理的一个重要任务,其目的是提高测量信号质量,突出测量信号特征。笔者提出一种以新型多小波——V系统函数系<sup>[1-7]</sup>为基

础的随钻声波测井曲线降噪算法,该方法使用V系统函数将测井曲线进行分解,在去掉高频分量后,再重构获得可用信噪比的测井曲线。

## 1 随钻声波测井中噪声的发生机理

随钻声波测井中,对采集的声波信号产生影响的噪声源主要有两大类:一个是井下钻井环境产生的噪声,另一个是电子器件产生的电子噪声。

文献[8]中研究了钻井环境对井下声波信息测量的影响。在钻井环境中,钻头、井底钻具组合、井内流动的泥浆都是噪声源,这些噪声在相干性、能量、延迟、频率、衰减特征等方面都表现出独特的特性。但

收稿日期:2008-09-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(10534040);国家自然科学基金面上项目(40574049和40874097);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070425028)

作者简介:肖红兵(1968-),男(汉族),甘肃金塔人,高级工程师,博士研究生,主要从事随钻测井仪器研究工作。

是,这类钻井噪声的主要成分的频率都很低,频率范围为1~4 kHz,钻井噪声的上限频率取舍点为3~4 kHz。文献[8]中还指出使用频率范围为5~25 kHz的带通滤波器,就可以去掉钻井环境产生的噪声。

在随钻声波测井仪器中,电子器件中电阻及各种导体都会在分子热运动的影响下产生热噪声,同时存在由于电子发射不均匀等产生散弹噪声。这是由自由电子作不规则运动所形成的,产生的噪声在频域上不存在信号能量突然变大的频带,在时域上也找不到信号能量突然变大的时间段,因此在频域和时域上的分布是一致的,是一种白噪声。标准白噪声的均值为零,方差为一常数。其产生原理跟电缆声波测井是相同的。被这种白噪声污染的声波信号,既不能在某个频带上修改,又不能在某时域上某个时刻修改,因为噪声的频带很宽,几乎占据了整个频域,使得与声波信号重叠,无法区分有用信号和噪声,因此一般的降噪方法很难达到令人满意的效果。

## 2 小波降噪技术

近年来,小波分析技术得到了快速发展,被誉为“数学显微镜”。小波分析理论具有独特的时频多尺度分析能力,因而成为信号处理等许多学科的经典数学工具,也是信号降噪的一种重要手段。小波变换作为一种多尺度信号分析方法克服了傅里叶变换固定分辨率的弱点,既可分析信号概貌,又可分析信号的细节,使得利用小波变换进行信息降噪成为热点课题<sup>[8-11]</sup>。

一个含噪声的一维信号的模型可表示为

$$S_n(i) = S(i) + \sigma e(i), i = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

式中, $S(i)$ 为真实信号; $e(i)$ 为噪声; $\sigma$ 为噪声信号的系数; $S_n(i)$ 为含噪信号。

基于小波变换的降噪方法是利用小波变换中的变尺度特性,对确定信号具有一种“集中”的能力。而且,噪声在越大尺度下对小波系数的值影响越小。

在实际工程中,信号经小波变换后,噪声通常表现为高频信号,而有用信号通常表现为低频信号,所以消噪过程可按以下方法进行处理:首先对实际信号进行小波分解,选择小波并确定分解层次为 $N$ ;然后对小波分解的高频系数进行门限阈值量化处理;最后根据小波分解的第 $N$ 层低频系数和经过量化后的1~ $N$ 层高频系数进行小波重构,达到消除噪声的目的,即抑制信号的噪声,在实际信号中恢复真实信号<sup>[9-13]</sup>。

## 3 线性V系统及其多分辨特性

文献[1]中构造了 $L_2[0,1]$ 空间上的一类正交完备函数系,命名为“ $k$ 次V系统”。这是一类多小波,由分段多项式构成,结构简单,且有多分辨的特性,有详细简明的数学表达式。其中0次V系统就是著名的Haar函数系,因此,V系统也可以看作是Haar函数系的推广。离散V变换(DVT)是V系统离散化之后得到的正交变换,在信号变换中与斜变换和离散余弦变换(DCT)相比更有优势<sup>[1-7]</sup>。

$k$ 次V系统是 $L_2[0,1]$ 空间上的完备正交函数系,是分组分类构造的。第1组由 $[0,1]$ 上前 $k+1$ 个Legendre多项式组成<sup>[1]</sup>,记为 $\{V_{k,1}^1(x), V_{k,1}^2(x), \dots, V_{k,1}^{k+1}(x)\}$ 。

第2组由 $k+1$ 个 $k$ 次生成元组成,记为 $\{V_{k,2}^1(x), V_{k,2}^2(x), \dots, V_{k,2}^{k+1}(x)\}$ 。这组生成元具有如下3条性质<sup>[1]</sup>:

- ①  $V_{k,2}^i$ 是以 $x=1/2$ 为结点的分段 $k$ 次多项式;
- ②  $\langle V_{k,2}^i, V_{k,2}^j \rangle = \delta_{ij}, i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$ ;
- ③  $\langle V_{k,2}^i, x^j \rangle = 0, j \in \{0, 1, \dots, k\}, i \in \{1, 2, \dots, m\}$ 。

第 $n$ 组按如下方式构造:

$$V_{k,n}^{i,j}(x) = \begin{cases} \sqrt{2^{n-2}} V_{k,2}^i \left[ 2^{n-2} \left( x - \frac{j-1}{2^{n-2}} \right) \right], & x \in \left( \frac{j-1}{2^{n-2}}, \frac{j}{2^{n-2}} \right), \\ 0, & \text{其他,} \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, k+1, j = 1, 2, \dots, 2^{n-2}, n = 3, 4, 5, \dots$$

则 $[0,1]$ 上的函数系:

第1组  $V_{k,1}^1(x), V_{k,1}^2(x), \dots, V_{k,1}^{k+1}(x)$ ;

第2组  $V_{k,2}^1(x), V_{k,2}^2(x), \dots, V_{k,2}^{k+1}(x)$ ;

$$\text{第3组} \begin{cases} V_{k,3}^{1,1}(x), V_{k,3}^{1,2}(x), \text{——第1类,} \\ V_{k,3}^{2,1}(x), V_{k,3}^{2,2}(x), \text{——第2类,} \\ \dots, \\ V_{k,3}^{k+1,1}(x), V_{k,3}^{k+1,2}(x), \text{——第}k+1\text{类;} \end{cases}$$

.....

第 $n$ 组:

$$\begin{cases} V_{k,n}^{1,1}(x), V_{k,n}^{1,2}(x), \dots, V_{k,n}^{1,2^{n-2}}(x), \text{——第1类,} \\ V_{k,n}^{2,1}(x), V_{k,n}^{2,2}(x), \dots, V_{k,n}^{2,2^{n-2}}(x), \text{——第2类,} \\ \dots, \\ V_{k,n}^{k+1,1}(x), V_{k,n}^{k+1,2}(x), \dots, V_{k,n}^{k+1,2^{n-2}}(x), \text{——} \\ \text{第}k+1\text{类;} \end{cases}$$

.....

称为  $k$  次 V 系统。分别取  $k = 1, 2$  获得的 V 系统函数系如图 1, 2 所示。其中 1 次 V 系统函数系显示了前 16 个函数, 2 次 V 系统函数系显示了前 24 个函数。

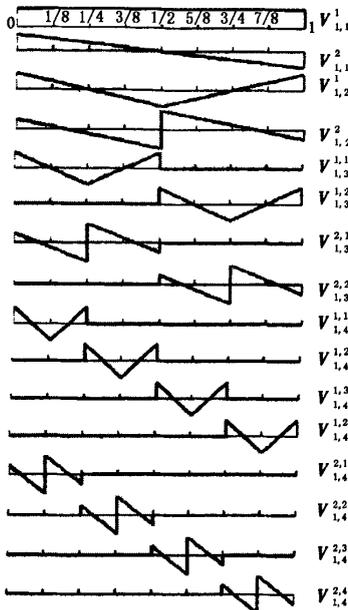


图 1 一次 V 系统

Fig. 1 1-degree V system

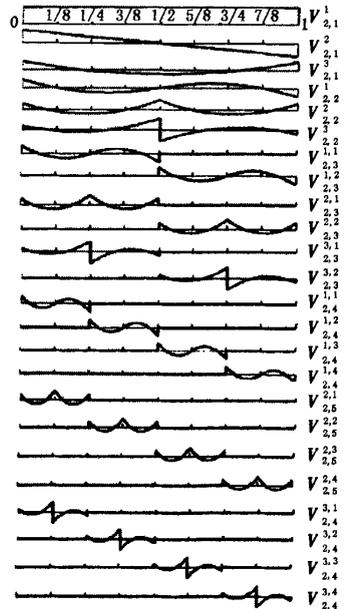


图 2 二次 V 系统

Fig. 2 2-degree V system

符号  $V_{k,n}^{i,j}$  表示  $k$  次 V 系统中第  $n$  组第  $i$  类的第  $j$  个函数,  $k = 0, 1, 2, \dots; n = 3, 4, \dots; i = 1, 2, \dots, k + 1; j = 1, 2, \dots, 2^{n-2}$ 。

$k = 1$  时的 V 系统又称为线性 V 系统, 本文中采用的就是线性 V 系统。如图 1 所示, 具体的表达式如下。

第一组函数是由  $[0, 1]$  区间上的前 2 个 Legendre 多项式组成(见图 1 前两条曲线):

$$V_{1,1}^1(x) = 1, \quad V_{1,1}^2(x) = \sqrt{3}(1 - 2x), \quad 0 \leq x \leq 1.$$

第二组函数是由两个生成元构成(见图 1 第 3, 4 条曲线):

$$V_{1,2}^1 = \begin{cases} \sqrt{3}(1 - 4x), & 0 \leq x < 1/2, \\ \sqrt{3}(4x - 3), & 1/2 < x \leq 1; \end{cases}$$

$$V_{1,2}^2 = \begin{cases} 1 - 6x, & 0 \leq x < 1/2, \\ 5 - 4x, & 1/2 < x \leq 1. \end{cases}$$

第  $n$  组的一般项表达式分成了两类。

第 1 类:

$$V_{1,n}^{1,j}(x) = \begin{cases} \sqrt{2^{n-2}} V_{1,2}^1 \left[ 2^{n-2} \left( x - \frac{j-1}{2^{n-2}} \right) \right], & x \in \left( \frac{j-1}{2^{n-2}}, \frac{j}{2^{n-2}} \right), \\ 0, & \text{其他}; \end{cases}$$

第 2 类:

$$V_{1,n}^{2,j}(x) = \begin{cases} \sqrt{2^{n-2}} V_{1,2}^2 \left[ 2^{n-2} \left( x - \frac{j-1}{2^{n-2}} \right) \right], & x \in \left( \frac{j-1}{2^{n-2}}, \frac{j}{2^{n-2}} \right), \\ 0, & \text{其他}, \end{cases}$$

$$n = 3, 4, \dots, j = 1, 2, \dots, 2^{n-2}.$$

其中,  $V_{1,n}^{i,j}(x)$  表示线性 V 系统中第  $n$  组第  $i$  类的第  $j$  个函数, 是通过第 2 组函数压缩再复制得到的, 在这个意义上说第 2 组的函数是生成元。图 1 其余的曲线分别画出了第 3, 4 组函数。

令  $V_0 = \text{span} \{ V_{k,1}^i(x), i = 1, 2, \dots, k + 1 \}$ , 则  $\dim V_0 = k + 1$ 。记  $W_0 = \text{span} \{ V_{k,2}^i(x), i = 1, 2, \dots, k + 1 \}$ , 则  $\dim W_0 = k + 1$ 。记

$$W_1 = \text{span} \{ V_{k,3}^{1,1}(x), V_{k,3}^{1,2}(x), V_{k,3}^{2,1}(x), V_{k,3}^{2,2}(x), \dots, V_{k,3}^{k+1,1}(x), V_{k,3}^{k+1,2}(x) \};$$

$$W_2 = \text{span} \{ V_{k,4}^{1,1}(x), V_{k,4}^{1,2}(x), V_{k,4}^{1,3}(x), V_{k,4}^{1,4}(x), V_{k,4}^{2,1}(x), V_{k,4}^{2,2}(x), V_{k,4}^{2,3}(x), V_{k,4}^{2,4}(x), \dots, V_{k,4}^{k+1,1}(x), V_{k,4}^{k+1,2}(x), V_{k,4}^{k+1,3}(x), V_{k,4}^{k+1,4}(x) \}.$$

对  $n = 3, 4, 5, \dots$ , 令

$$W_{n-2} = \text{span} \{ V_{k,n}^{1,1}(x), V_{k,n}^{1,2}(x), \dots, V_{k,n}^{1,2^{n-2}}(x), V_{k,n}^{2,1}(x), V_{k,n}^{2,2}(x), \dots, V_{k,n}^{2,2^{n-2}}(x), \dots, V_{k,n}^{k+1,1}(x), V_{k,n}^{k+1,2}(x), \dots, V_{k,n}^{k+1,2^{n-2}}(x) \},$$

则  $\dim W_{n-2} = 2^{n-2}(k + 1)$ 。令  $V_{j+1} = V_j \oplus W_j, j = 0, 1, 2, 3, \dots$ , 于是得到

$$V_j \perp W_j, \quad V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \dots, \text{且 } \bigcup_{j \geq 0} V_j = L^2[0, 1].$$

因此 V 系统具有多分辨特性<sup>[7]</sup>。

### 4 基于 V 系统的随钻声波数据降噪

k 次 V 系统是  $L_2[0,1]$  空间上的正交完备函数系,把函数  $F$  在 V 系统下的正交展开也称为函数  $F$  的 Fourier-V 级数。设  $V_i^k$  是 k 次 V 系统依次排序的第 i 个函数,给定函数  $F$ ,则  $F$  的 Fourier-V 级数为

$$F \sim \sum_{i=0}^{\infty} b_i^k V_i^k.$$

其中  $b_i^k = \langle F, V_i^k \rangle = \int_0^1 F(t) V_i^k(t) dt, i = 0, 1, 2, \dots$ , 也称为函数  $F$  的谱。

V 系统的数据降噪就是使用 V 系统对数字信号进行 V 系统级数展开,然后去掉高频分量,根据 V 系统的再生性,重构原数据。

因为数据是离散的,需要经过离散 V 变换来实现,离散 V 变换是 V 系统离散化之后得到的正交变换。从 V 系统的基函数得到离散 V 变换所对应的正交矩阵  $V_N$  ( $N$  阶矩阵) 的过程<sup>[7]</sup> 如下:

(1) 计算 k 次 V 系统中前  $N$  个基函数在  $[0,1]$  区间的  $2N$  等分点处的函数值,得到一个  $N$  阶矩阵,即采用基函数等间隔取点法得到一个  $N$  阶矩阵,一般来说这个矩阵不一定是正交矩阵。

(2) 对上述  $N$  阶矩阵进行正交化,得到正交矩阵  $V_N$ 。

本文中用到的  $V_{16}$  详细表达<sup>[7]</sup> 为

$$V_{16} = \begin{bmatrix} A_1 & A_3 & 0 & A_4 & 0 & A_5 & 0 & A_6 & 0 \\ A_2 & 0 & A_3 & 0 & A_4 & 0 & A_5 & 0 & A_6 \end{bmatrix}^T.$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 \\ 0.4067 & 0.3525 & 0.2983 & 0.2440 & 0.1898 & 0.1356 & 0.0813 & 0.0271 & 0.0271 \\ 0.3819 & 0.2728 & 0.1637 & 0.0546 & -0.0546 & -0.1637 & -0.2728 & -0.3819 & 0.3819 \\ -0.2071 & 0.1124 & 0.0178 & -0.0769 & -0.1716 & -0.2663 & -0.3610 & -0.4556 & 0.4556 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 & 0.2500 \\ -0.0271 & -0.0813 & -0.1356 & -0.1898 & -0.2440 & -0.2983 & -0.3525 & -0.4067 & 0.4067 \\ -0.3819 & -0.2728 & -0.1637 & 0.0546 & 0.0546 & 0.1637 & 0.2728 & 0.3819 & -0.3819 \\ 0.4556 & 0.3610 & 0.2663 & 0.1716 & 0.0769 & -0.0178 & -0.1124 & -0.2071 & 0.2071 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = [0.4743 \quad 0.1581 \quad -0.1581 \quad -0.4743 \quad -0.4743 \quad -0.1581 \quad 0.1581 \quad 0.4743],$$

$$A_4 = [0.2415 \quad -0.0345 \quad -0.3105 \quad -0.5866 \quad 0.5866 \quad 0.3105 \quad 0.0345 \quad -0.2415],$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0.5000 & -0.5000 & -0.5000 & 0.5000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5000 & -0.5000 & -0.5000 & 0.5000 \end{bmatrix},$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} 0.2236 & -0.6708 & 0.6708 & -0.2236 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2236 & -0.6708 & 0.6708 & -0.2236 \end{bmatrix}.$$

设数据信号  $f = [f_0 \quad f_1 \quad \dots \quad f_{N-1}]$ , 则  $f$  的离散 V 变换为

$$[F_0 \quad F_1 \quad \dots \quad F_{N-1}]' = V_N [f_0 \quad f_1 \quad \dots \quad f_{N-1}].$$

或写成  $F' = V_N f$ , 其反变换为  $f = V_N^{-1} F'$ 。  $F_i (i = 0, 1, \dots, N-1)$  称为信号  $f$  的谱。

由此看出,声波数据经离散 V 变换,得到频域空间的一个矩阵,这个矩阵再经相应的离散逆 V 变换就回到声波数据。

V 变换是正交变换,具有变换后系数集中的特点。大多数有用信息将以大系数的形式集中于低频,而噪声及细节信息将以小系数形式存在于高频,因此基于 V 变换的数据降噪可以采用阈值降噪法。

### 5 降噪试验及其结果分析

本文中针对在随钻声波测井中产生的高斯噪声,进行降噪试验。因为随钻声波测井仪正在研制当中,没有实际数据产生,但是由于随钻声波测井与电缆声波测井的测井原理相同,测井过程中测量仪器电路形成的电子噪声表现现象类似,所以试验数据采用川东北某气田电缆测井信号,采样点数为 256。随机选择的测点数据如图 3 所示,图 4 是图 3 测点数据加了高斯噪声的结果。

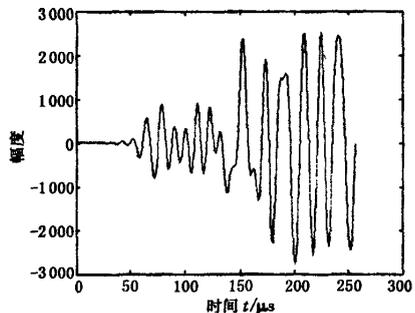


图 3 原始声波曲线

Fig. 3 Original acoustic curve

图 5 是采用 V 系统降噪的结果,图 6 是使用小波函数 (db3) 的降噪效果。可以看出,使用 V 系统降噪的效果要优于使用 db3 小波降噪效果,在初至波即将到达的区域最为明显,且对纵波声速的检测至关重要。

对经过降噪后数据的峰值信噪比进行计算。表1中给出了30组测点的对比数据,绝大多数情况(28/30)使用V系统降噪效果要优于db3小波。只有第9组和第24组,使用V系统降噪效果稍差于db3小波。30组数据平均结果,使用V系统降噪的信号的平均峰值信噪比为31.9275,使用db3小波降噪的信号为31.0937,说明V系统降噪效果要优于db3小波。

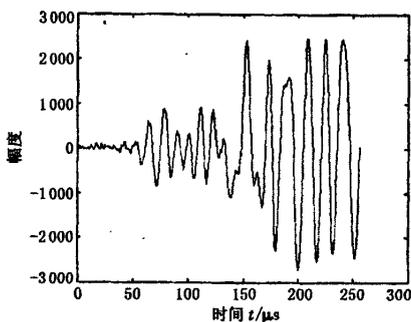


图4 增加了高斯噪声的声波曲线  
Fig.4 Acoustic curve with Gaussian noise

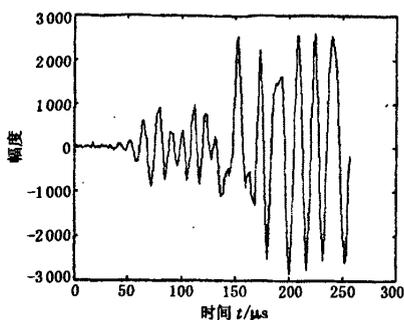


图5 使用V系统降噪效果  
Fig.5 Denoising results by V-system

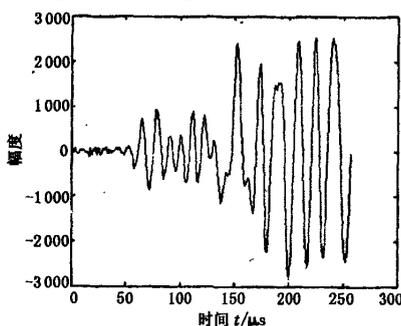


图6 使用小波(db3)的降噪效果  
Fig.6 Denoising results by wavelet (db3)

表1 V系统降噪和小波(db3)降噪的峰值信噪比

Table 1 Peak signal-to-noise ratio results by V-system and wavelet(db3) denoising method

序号	db3 小波	V 系统	序号	db3 小波	V 系统	序号	db3 小波	V 系统
1	31.5268	32.5456	11	29.7664	30.7546	21	29.3906	30.2325
2	29.8149	30.5068	12	28.9911	30.2495	22	28.8022	29.7740
3	31.3894	32.2022	13	30.5287	31.4336	23	32.4649	33.6229
4	30.0559	30.9506	14	29.9639	30.9630	24	34.4943	34.3065
5	29.4892	30.1399	15	29.3668	29.5709	25	36.6274	37.1181
6	31.1478	32.3435	16	29.3807	30.3801	26	33.9875	35.3663
7	31.0558	31.9119	17	29.8125	30.2564	27	35.5246	37.1007
8	29.4035	30.1622	18	28.2731	28.4824	28	35.8617	37.2674
9	30.8845	30.4469	19	29.1910	30.3549	29	32.2528	33.6741
10	30.8598	31.6983	20	29.7065	30.2680	30	32.7970	34.1298

## 6 结束语

针对随钻声波测井过程中的电子噪声,提出了一种基于V系统的声波信号数据降噪算法。该算法通过对声波信号进行V系统变换,然后将高频部分消除,反变换得到降噪后的声波信号。试验结果证明,该算法对于声波测井信号具有较好的降噪效果。

### 参考文献:

[1] SONG Rui-xia, MA Hui, WANG Tian-jun, et al. Complete orthogonal V-system and its applications[J]. Communications on Pure and Applied Analysis, 2007,6(3): 853-871.

[2] 梁延研,宋瑞霞,齐东旭. 完备正交V-系统与点云数据拟合[J]. 系统仿真学报,2006,18(8):2109-2113.  
LIANG Yan-yan, SONG Rui-xia, QI Dong-xu. Complete orthogonal function V system and points cloud fitting[J]. Journal of System Simulation, 2006,18(8):2109-2113.

[3] 梁延研,宋瑞霞,王小春,等. 完备正交V-系统及其在几何信息重构中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2007,19(7):871-875.  
LIANG Yan-yan, SONG Rui-xia, WANG Xiao-chun, et al. Complete orthogonal V-system and its application in geometrical information reconstruction [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007,19(7):871-875.

(下转第69页)

- [4] 张宇,况雨春,伍开松. 基于有限元法的热采井套损机理研究[J]. 钻采工艺, 2008, 31(4):102-104.  
ZHANG Yu, KUANG Yu-chun, WU Kai-song. Research on casing failure mechanism of thermal production well based on finite element method [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(4):102-104.
- [5] JIANG Wu. Casing temperature and stress analysis in steam-injection wells[R]. SPE 103882, 2006.
- [6] GARSIDE R, PATTILLO P D, SATHUVALLI U B. Special issues in the stress analysis of casing strings in steam injection wells; mathematical development and design [R]. SPE 105930, 2007.
- [7] 邓虎. 热采井中套管偏心对井筒温度场和应力场的影响研究[J]. 石油矿场机械, 2008, 37(3):6-9.  
DENG Hu. Effect caused by casing eccentricity in thermal well on wellbore temperature field and stress field [J]. Oil Field Equipment, 2008, 37(3):6-9.
- [8] 宋洵成,赵洪山,管志川. 稠油热采井套管的预应力分析[J]. 石油钻采工艺, 2006, 28(4):64-67.  
SONG Xun-cheng, ZHAO Hong-shan, GUAN Zhi-chuan. Prestress analysis of casing strings in heavy oil thermal production wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 28(4):64-67.
- [9] JIANG Wu, GONZALEZ M E, HOSN N. Steam injection casing design[R]. SPE 93833, 2005.
- [10] 王兆会,马兆忠. 热采井温度对套管性能的影响及预应力值计算方法[J]. 钢管, 2007, 36(4):24-27.  
WANG Zhao-hui, MA Zhao-zhong. Effect by thermal well temperature on casing properties and calculation method for pretension [J]. Steel Pipe, 2007, 36(4):24-27.
- [11] 李子丰,马兴瑞,黄文虎. 热采井套管柱力学分析[J]. 工程力学, 1998, 15(2):19-26.  
LI Zi-feng, MA Xing-rui, HUANG Wen-hu. Mechanical analysis of casing in thermal recovery wells [J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(2):19-26.
- [12] 徐秉业,王建国. 弹性力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [13] 余中红,刘大伟,王立洋. 注蒸汽井套管应力数值计算与工业应用[J]. 力学与实践, 2008, 30(1):66-69.  
YU Zhong-hong, LIU Da-wei, WANG Li-yang. Numerical simulation and industrial application of the casing production stress inside steam injection wells [J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(1):66-69.

(编辑 李志芬)

(上接第62页)

- [4] 马辉,宋瑞霞,王小春. V描述子与B样条曲线[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(11):1717-1722.  
MA Hui, SONG Rui-xia, WANG Xiao-chun. V-descriptor and B-spline [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(11):1717-1722.
- [5] SONG Rui-xia, LIANG Yan-yan, WANG Xiao-chun, et al. Elimination of gibbs phenomenon in computational information based on the V-system [C]//HU Bin. Proceedings of the Second International Conference on Pervasive Computing and Applications. Birmingham; IEEE Press, c2007:337-341.
- [6] SONG Rui-xia, OU Mei-fang. The application of V-system in the digital image transform [C]//LIU Yun-hui. Proceedings of the IEEE International Conference on Information Acquisition. Beijing; IEEE Press, c2008:296-301.
- [7] 欧梅芳,宋瑞霞. V系统在图像消噪中的应用 [C]//彭群生. 全国第十五届计算机辅助设计与图形学学术会议论文集, 北京:机械工业出版社, c2008:599-602.
- [8] JENNIFER Market, CRAIG Barnett, RON Deady, et al. New processing techniques to meet challenges of LWD acoustic logging [R]. SPE 71731, 2001.
- [9] DONOHO D L. Denoised by soft thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41:613-627.
- [10] DONOHO D L, JOHNSTONE I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81:425-455.
- [11] SHARK L K, YU C. Denoising by optimal fuzzy thresholding in wavelet domain [J]. IEEE Electron Lett, 2000, 36(6):581-582.
- [12] LIU Z G, QIAN Q Q. Adaptive shrinkage noising method of fault transient signals with multi-wavelets [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(7):878-880.
- [13] TAO G, HE F J, YUE W Zh, et al. Processing of array sonic logging data with multi-scale STC technique [J]. Petroleum Science, 2008, 5(3):238-241.

(编辑 修荣荣)