

文章编号: 0253-2697(2013)02-0353-06 DOI: 10.7623/syxb201302019

钻井液连续压力波信号的延迟差动检测及信号重构

沈 跃¹ 崔诗利¹ 张令坦¹ 苏义脑² 盛利民² 李 林²

(1. 中国石油大学理学院 山东青岛 266580; 2. 中国石油集团钻井工程技术研究院 北京 100195)

摘要:根据钻井泵产生的泵干扰与钻井液压力信号的传输路径分析,建立了信号延迟差动检测数学模型;根据检测管路的传输函数分析,建立了短距离直管路传输有限频带信号的理想低通滤波器数学模型;以数学分析为基础,分别在时域和频域研究了钻井液连续压力波信号的数学重构方法。基于无限冲击响应(IIR)理论,通过时域差分方程建立了信号重构数学模型;基于延迟差动检测信号的傅里叶正、逆变换建立了从频域实现信号重构的数学模型。通过频域重构数学模型的极点频率与信号传输延迟之间的理论关系,建立了压力传感器间距的约束条件,为传感器的合理布置提供了理论依据。理论计算与数值仿真表明,信号延迟差动检测方法可以有效地消除泵干扰的影响,通过时域和频域的数学模型均可实现钻井液压力相移键控信号的重构与恢复,信号的信噪比(SNR)大幅提高,在测量直管路长度符合压力传感器间距的约束条件下,两种重构方法均可获得满意的信号质量。

关键词:泵干扰;钻井液连续压力波;延迟差动检测;信号重构;时域分析;频域分析

中图分类号: TE927.6

文献标识码: A

Delay differential detection and signal reconstruction of continuous pressure-wave signals of drilling fluid

SHEN Yue¹ CUI Shili¹ ZHANG Lingtan¹ SU Yinao² SHENG Limin² LI Lin²

(1. College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Drilling Technology Research Institute, CNPC, Beijing 100195, China)

Abstract: A mathematical model for delay differential detection of signals was built based on analyzing pump interference induced by a drill pump and transmission paths of drilling-fluid pressure signals. A functional analysis on transmission of detection conduits was applied to build an ideal low-pass filter mathematical model for limited frequency band signals in short-distance straight-conduit transmission. A mathematical reconstruction approach of continuous pressure-wave signals of drilling liquid was studied in time domain and frequency domain, respectively, based on mathematical analysis. A mathematical model for signal reconstruction was established with a differential equation in time domain based on infinite impulse response (IIR) theory and so was a mathematical model for signal reconstruction in frequency domain established with Fourier forward and inverse transform based on the delay differential detection of signals. Therefore, constraint conditions for space between pressure sensors were defined according to theoretical relationship between pole frequencies of the reconstruction mathematical model in frequency domain and signal transmission delay, which lays a theoretic basis for rational arrangement of sensors. Theoretical calculation and numerical simulation showed that the delay differential detection method of signals can effectively eliminate influence of pump interference. The reconstruction and recovery of pressure phase-shift and keying signals of drilling fluid can be successfully achieved with mathematical models in both time and frequency domains, in which signal to noise ratio (SNR) of signals can be increased significantly. Therefore, qualified signals can be obtained with both reconstruction methods so long as length of measuring straight conduits accords with the constraint condition of the space between pressure sensors.

Key words: pump interference; continuous pressure wave of drilling fluid; delay differential detection; signal reconstruction; time domain analysis; frequency domain analysis

钻井液压力信号通过钻柱自井底向地面传输及地面信号检测过程中会遇到很大的噪声与干扰,其中对信号影响最大的是钻井泵产生的钻井液压力脉动干扰(泵干扰)。泵干扰与泵冲速率有关,包含基波和高次

谐波,当钻井泵各缸活塞存在密封问题造成工作的不平衡或泵处于非正常工作状态时,某些高次谐波的幅值会变得很大,尽管钻井泵管路均安装有压力缓冲器或阻尼器,但泵产生的压力脉动仍可达到或超过立管

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51274236)及国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A101)资助。

第一作者及通讯作者:沈 跃,男,1961年7月生,2009年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,现为中国石油大学(华东)教授,主要从事井下系统、信息与控制工程及智能检测技术研究。Email:sheny1961@yahoo.com.cn

检测到的井下信号强度^[1-3],这些高次谐波会进入钻井液连续压力波信号的频带,从而产生极大的干扰,使得信号的信噪比严重降低,且使用常规信号处理方法无法消除,从而影响井下随钻测量信号的提取。对于如何消除泵干扰的影响,Marsh等^[4]提出匹配滤波器法,将泵干扰看做随机噪声,通过计算信号的自相关系数来消除,但泵干扰是具有一定规律的系统干扰而非随机噪声,因此该方法的结论有待商榷;Brandon等^[5]提出自适应补偿法,通过自动调整所抽取的干扰信号强度来抵消原信号的噪声影响,但效果有限;有的研究者^[6-8]提出了基于延迟差动检测技术可以消除泵干扰影响;Foster等^[9]介绍了信号延迟差动检测的基本数学原理及单频信号的简单恢复方法,其信号恢复要求传感器间距应等于四分之一信号波长,由于钻井液连续压力波信号为包含许多频率成分的频带信号,因此该文献提出的方法不适用于井下信号的恢复。笔者等根据泵干扰与钻井液压力信号的传输路径分析,建立了信号的延迟差动检测数学模型,在消除泵干扰的基础上通过离散信号的数学重构来进行钻井液连续压力波信号的时域恢复,并在时、频两域研究了信号的重构方法及传感器间距的约束条件。

1 钻井液压力信号的延迟差动检测数学模型

钻井液压力信号的延迟差动检测系统采用相距一段距离的两个传感器进行信号的检测与处理,图1为检测系统示意图。在井口与钻井泵之间的一段钻井液直管路中安装两个压力传感器A和B,间距为 L_0 ,两传感器接收到的压力信号包含井下信号(钻井液连续压力波信号 $s(t)$ 和井下随机噪声 $n(t)$)及钻井泵产生的泵干扰 $n_p(t)$, t 为时间变量。根据信号流向分析,泵干扰的传输方向与井下信号相反,设 c_0 为压力波传播速度,则压力波在传感器A、B之间的传输时间为 $\tau_0 = L_0/c_0$ 。

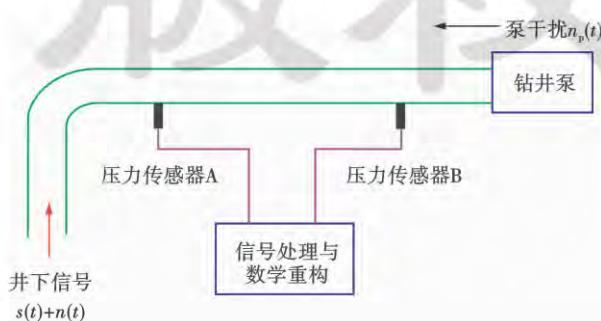


图1 钻井液压力信号延迟差动检测系统

Fig. 1 Delay differential detection system of drilling fluid pressure signal

将传感器A、B之间的管路看做线性系统,设其频率响应为

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \cdot e^{-j\omega\tau_0} \quad (1)$$

式中: $|H(j\omega)|$ 为A、B间管路频域传递函数的模; ω 为角频率; $e^{-j\omega\tau_0}$ 为时延 τ_0 产生的相移。

设系统 $H(j\omega)$ 的单位冲击响应为 $h(t)$,根据时域信号通过线性系统产生的卷积响应^[10],A、B两传感器接收到的信号可以表示为

$$\begin{cases} p_A(t) = s(t) + n(t) + h(t) * n_p(t) \\ p_B(t) = h(t) * [s(t) + n(t)] + n_p(t) \end{cases} \quad (2)$$

将 $p_B(t)$ 卷积 $h(t)$,根据卷积的交换律和分配率得到

$$\begin{aligned} h(t) * p_B(t) &= h(t) * h(t) * [s(t) + n(t)] + \\ &\quad h(t) * n_p(t) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)意味着将信号 $p_B(t)$ 再通过一个单位冲击响应为 $h(t)$ 的线性系统,由于 $h(t)$ 含有信号通过A、B间管路产生的延迟 $\tau_0 = L_0/c_0$,其物理意义为将 $p_B(t)$ 延迟一个 τ_0 时间再进行检测。

将式(2)中的 $p_A(t)$ 与式(3)相减得到延迟差动检测信号:

$$p_A(t) - h(t) * p_B(t) = s(t) + n(t) - \\ h(t) * h(t) * [s(t) + n(t)] \quad (4)$$

由式(4)可以看出,泵干扰项 $n_p(t)$ 通过 $p_B(t)$ 与 $h(t)$ 的卷积并与 $p_A(t)$ 的差动运算被消除掉。

对式(4)取傅里叶变换得:

$$\begin{aligned} P_A(j\omega) - P_B(j\omega) * H(j\omega) &= \\ [S(j\omega) + N(j\omega)] * [1 - H(j\omega) * H(j\omega)] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $P_A(j\omega)$ 、 $P_B(j\omega)$ 、 $H(j\omega)$ 、 $S(j\omega)$ 、 $N(j\omega)$ 分别为 $p_A(t)$ 、 $p_B(t)$ 、 $h(t)$ 、 $s(t)$ 、 $n(t)$ 的傅里叶变换。

井下信号项的频谱密度函数为

$$S(j\omega) + N(j\omega) = H'(j\omega)[P_A(j\omega) - \\ P_B(j\omega) * H(j\omega)] \quad (6)$$

式中: $H'(j\omega) = \frac{1}{1 - H(j\omega) * H(j\omega)}$ 为井下信号恢复系统的传递函数,通过 $H'(j\omega)$ 可实现井下信号的重构。

2 井下信号的数学重构

2.1 基于时域差分方程的信号重构

根据式(6),将延迟差动检测信号 $p_A(t) - h(t) * p_B(t)$ 通过一个频域传递函数为 $H'(j\omega)$ 的井下信号恢复系统,其频域响应的时域解即为井下信号的重构。

要实现井下信号的重构, $h(t)$ 的构建是个关键问题。受传输距离和信号传输速率的限制,钻井液连续压力波信号频谱的最高频率通常为几十赫兹,因此信号的频率是有限的。在有限频带内,钻井液连续压力

波信号通过压力传感器 A、B 间管路时的幅度衰减相对不变, 可以将其看做无失真的传输系统。设该段管路的传输系数为常数 a , 则该段管路构成一个理想低通滤波器, 系统频域传递函数为

$$H(j\omega) = aG(\omega)e^{-j\omega\tau_0} \quad (7)$$

式中: $G(\omega)$ 为单位门函数。根据理想低通滤波器的单位冲击响应^[1], 有:

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{a\omega_b}{\pi} \cdot \frac{\sin[\omega_b(t - \tau_0)]}{\omega_b(t - \tau_0)} = \\ &\frac{a\omega_b}{\pi} Sa[\omega_b(t - \tau_0)] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $Sa(t)$ 为抽样函数; ω_b 为单边带宽。

设 $H_1(j\omega) = \frac{1}{H'(j\omega)} = \frac{Y_1(j\omega)}{X_1(j\omega)}$, 则有:

$$Y_1(j\omega) = X_1(j\omega) - H(j\omega) \cdot H(j\omega) \cdot X_1(j\omega) \quad (9)$$

式中: $Y_1(j\omega)$ 为系统 $H_1(j\omega)$ 的输出函数; $X_1(j\omega)$ 为输入函数。

系统 $H_1(j\omega)$ 输出的时域响应或时域函数为

$$y_1(t) = x_1(t) - \left(\frac{a\omega_b}{\pi}\right)^2 Sa(\omega_b t) * Sa(\omega_b t) * x_1(t - 2\tau_0) \quad (10)$$

式中: $y_1(t)$ 和 $x_1(t)$ 为 $Y_1(j\omega)$ 和 $X_1(j\omega)$ 的傅里叶逆变换。

由于 $H_1(j\omega)$ 与 $H'(j\omega)$ 为倒数关系, 其输入输出互为反函数, 则有

$$x(t) = y(t) - \left(\frac{a\omega_b}{\pi}\right)^2 Sa(\omega_b t) * Sa(\omega_b t) * y(t - 2\tau_0) \quad (11)$$

由此得到 $H'(j\omega)$ 系统输出的时域解为

$$y(t) = x(t) - \left(\frac{a\omega_b}{\pi}\right)^2 Sa(\omega_b t) * Sa(\omega_b t) * y(t - 2\tau_0) \quad (12)$$

式中: $x(t) = p_A(t) - p_B(t) * \frac{a\omega_b}{\pi} Sa[\omega_b(t - \tau_0)]$ 为延

迟差动检测信号; $y(t) = s(t) + n(t)$ 为重构的井下信号。

将连续时间系统转换为离散时间的 Z 系统, 令 $z = e^{j\omega T_s}$, $k = 2\tau_0/T_s$, $t = NT_s$, T_s 为采样周期, N 为采样序列数, 可得到 $H'(j\omega)$ 的 Z 变换形式

$$H'(z) = \frac{1}{1 - |H(z)|^2 z^{-k}} \quad (13)$$

根据数字滤波器理论, $H'(z)$ 为一个 k 阶无限冲击响应(IIR)滤波器系统^[12], 频率响应类似具有锐截止特性的低通滤波器, 且截止特性随 k 值增强。在 $H(z)$ 构成理想低通传输条件下, $H'(z)$ 的输出为差分方程:

$$\begin{aligned} y(N) &= x(N) + \left(\frac{a\omega_b}{\pi}\right)^2 Sa(\omega_b N) * \\ &Sa(\omega_b N) * y(N-k) \end{aligned} \quad (14)$$

由于式(14)与式(12)具有相同结构, 因此时域中信号重构过程的实质是使延迟差动检测信号通过一个具有递归结构的闭环延迟反馈系统 $H'(z)$, 以式(14)的递推算法获得延迟差动检测信号中包含的井下信号。

2.2 基于傅里叶逆变换的信号重构及极点频率分析

由于测量管路在有限频带 $\omega < \omega_b$ 内构成理想低通滤波器, 频域传递函数为 $H(j\omega) = aG(\omega)e^{-j\omega\tau_0}$, 则

$$\begin{aligned} H'(j\omega) &= \frac{1}{1 - a^2 G^2(\omega) \cdot e^{-j2\omega\tau_0}}, \text{ 式 (7) 变为 } S(j\omega) + \\ N(j\omega) &= \frac{[P_A(j\omega) - P_B(j\omega) \cdot H(j\omega)]}{1 - a^2 G^2(\omega) \cdot e^{-j2\omega\tau_0}}. \end{aligned}$$

通过傅里叶逆变换得到时域解^[13], 可实现信号重构:

$$\begin{aligned} y(t) &= s(t) + n(t) = \\ &\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[P_A(j\omega) - P_B(j\omega) \cdot H(j\omega)]}{1 - a^2 G^2(\omega) \cdot e^{-j2\omega\tau_0}} e^{j\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (15)$$

根据钻井液压力波的传输特性^[14], 参照刘修善^[15]提供的参数, 在测量管路内径 127 mm, 管道壁厚 9.2 mm, 水基钻井液粘度 20 mPa·s, 管材泊松比 0.3, 钻井液含气率 0.5%, 钻井液固相浓度 15%, 管材弹性模量 210 GPa, 水弹性模量 2.04 GPa, 钻井液固相弹性模量 16.2 GPa, 信号频率 40 Hz, 压力传感器相距小于 18 m 的条件下, 通过数值计算有 $a = 0.988$ 。

令 $a = 1$, 有限频带内 $H'(j\omega)|_{\omega < \omega_b} = \frac{1}{1 - G^2(\omega) \cdot e^{-j2\omega\tau_0}} = \frac{1}{1 - \cos(2\omega\tau_0) + j\sin(2\omega\tau_0)}$ 存在极点, 极点出现条件为 $2\omega\tau_0 = 2m\pi$ ($m = 1, 2, 3 \dots$), 对应极点频率为 $f_0 = m/(2\tau_0)$ 。

如果信号频谱的最高频率为 f_{\max} , 则有 $f_{\max} < f_b$, 当极点对应频率进入到理想低通滤波器通带, 极有可能进入信号频谱, 会对信号的重构造成极大干扰且无法去除。为避免出现此种情况, 所有极点频率值应大于理想低通滤波器通带频率 f_b , 即:

$$f_0 = m/(2\tau_0) > f_b \quad (16)$$

取 $m = 1$, 有 $\tau_0 < 1/(2f_b)$, 由此得到传感器间距的约束条件为

$$L_0 = \tau_0 c_0 < c_0/(2f_b) \quad (17)$$

管路中的压力波速计算可参照刘修善等^[16]的计算方法。以载频为 24 Hz 的钻井液压力 DPSK 信号为例, 信号频谱的最高频率为 36 Hz, 取 $f_b = 40$ Hz, 则 $\tau_0 < 1/80$ s, 如果压力波速为 $c_0 = 1280$ m/s, 对应的传感器

间距 $L_0 = \tau_0 c_0 < 16$ m, 即在此间距内极点频率不会进入理想低通滤波器通带并对信号的重构造成影响。

3 井下信号重构的数值仿真

数值仿真以钻井液压力 DPSK 信号^[17-19]为例, 设 $s(t) = A_c \sin[2\pi f_c t - f(t)]$, 式中: $f(t)$ 为相移函数; 信号载频 $f_c = 20$ Hz; 信号幅度 $A_c = 1$ Pa; 数据编码为 [1111111111]。根据 DPSK 压力信号的功率谱结构, 信号频谱的最高频率为 $f_{\max} = 30$ Hz, 信号功率为 $P_s = 0.5$ Pa², 噪声 $n(t) = 0$ 。泵干扰模拟泵冲速率 64 r/min 的三缸泵产生的多频压力脉动, 其中基波频率为 3.2 Hz, 谐波次数 2~9, 因此泵干扰的频率覆盖范围为 3.2~28.8 Hz, 设基波和各次谐波幅度均为 $A_i = 1$ Pa, 其功率密度可表示为冲击函数 $S(f) = (A_i/\sqrt{2})^2 \delta(f - f_i)$, 式中: $\delta(f)$ 为频域冲击函数; f_i 为泵干扰频谱中的各次频率值。则泵干扰的平均功率^[20]为

$$P_n = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) df = \sum_{i=1}^9 A_i^2 / 2 = 4.5 \text{ Pa}^2 \quad (18)$$

因此, 混入泵干扰后信号的信噪比 $SNR = P_s/P_n = 0.11$ 。图 2 为钻井液压力 DPSK 原信号及混入泵干扰后的波形和频谱, 可以看出, 在时域中 DPSK 信号完全淹没在泵干扰中, 频域中泵干扰频率完全覆盖了信号频谱, 从频域也已分辨不出原信号。

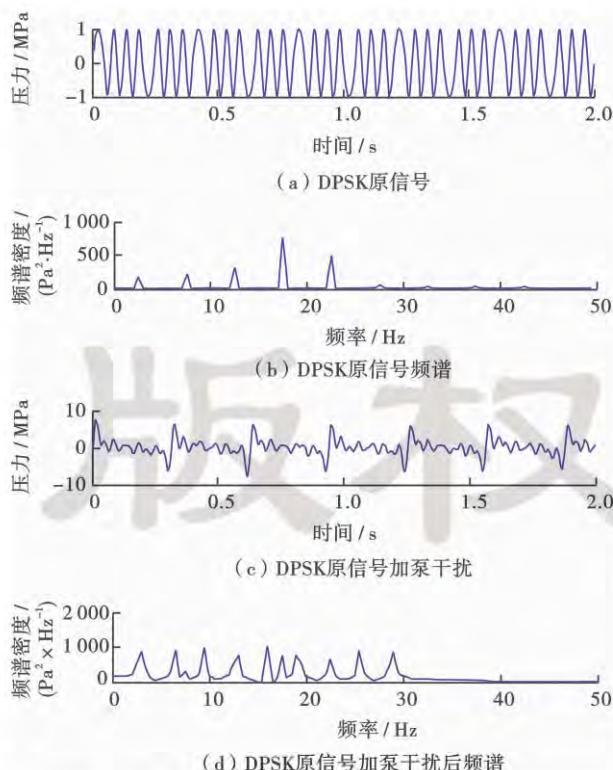


图 2 钻井液压力 DPSK 信号及混入泵干扰

Fig. 2 Drilling fluid pressure DPSK signal mixed with the drilling fluid pump interference

设传感器间距 $L_0 = 5$ m, 压力波速 $c_0 = 1280$ m/s, 测量管道传输系数 $a = 1$, 理想低通滤波器单边带宽 $f_b = 40$ Hz, 两传感器之间产生的信号延迟 $\tau_0 = L_0/c_0 = 3.91$ ms, 采样频率 $f_s = 1024$ Hz。

3.1 时域差分方程重构的信号仿真

根据式(12), 井下信号的重构函数为

$$\left\{ \begin{array}{l} y(t) = x(t) + \left(\frac{a\omega_b}{\pi}\right)^2 Sa(\omega_b t) * Sa(\omega_b t) * y(t - 2\tau_0) \\ x(t) = p_A(t) - p_B(t) * \frac{a\omega_b}{\pi} Sa[\omega_b(t - \tau_0)] \\ p_A(t) = s(t) + \frac{a\omega_b}{\pi} Sa[\omega_b(t - \tau_0)] * n_p(t) \\ p_B(t) = \frac{a\omega_b}{\pi} Sa[\omega_b(t - \tau_0)] * s(t) + n_p(t) \end{array} \right. \quad (19)$$

设信号在 $t = 0$ 时刻作用于系统, 系统只有零状态响应, 则 $t = 0$ 时刻之前的系统输出 $y(0^-) = 0$, 采用 MATLAB 仿真得到的 $y(t)$ 重构波形见图 3。从图 3(a) 的延迟差动检测信号可以看出, 泵干扰被完全消除, 图 3(b) 的钻井液压力 DPSK 重构信号与原信号的变化规律一致, 整体波形失真很小, 只是第一个码元调制波形略有失真, 这是由于随着 τ_0 的增大, 式(12)中参与递推运算的 $y(0^-) = 0$ 设定值增多引起的。数值计算表明, 上述条件下 DPSK 重构信号的信噪比为 $SNR = 72.4$, 远高于存在泵干扰时信号的信噪比, 大约提高了 657 倍。表 1 为基于时域差分方程重构的 DPSK 信号信噪比与延迟时间 τ_0 的数值计算结果, 可以看出, 随着延迟时间增加, 重构信号的信噪比有所下降, 但变化不大。

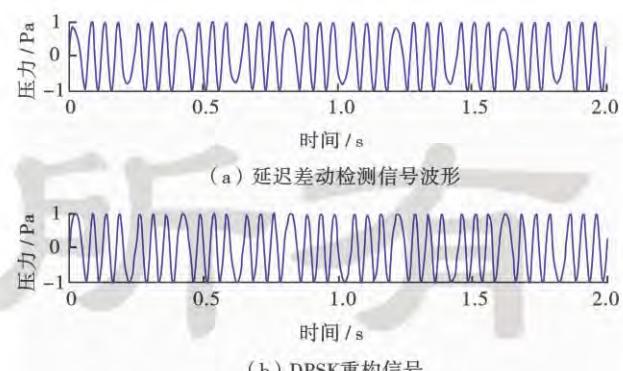


图 3 基于时域差分方程的钻井液压力 DPSK 信号重构

Fig. 3 Reconstruction of drilling fluid pressure DPSK signal based on time-domain differential equation method

实际信号传输过程中, 井下多参数的编码信号均以打包方式形成数据框集中传输, 数据框前部均插有多个周期的载波同步信号, 因此 τ_0 仅对同步信号会产生部分影响, 不会影响编码信号。

表1 基于时域差分方程重构的钻井液压力 DPSK 信号信噪比
Table 1 SNR of reconstructed drilling fluid pressure DPSK signal based on time domain differential equation method

| 延迟时间 τ_0/ms | 重构信号信噪比 SNR |
|-------------------------|-------------|
| 0.98 | 72.6 |
| 1.95 | 72.6 |
| 2.93 | 72.5 |
| 3.91 | 72.4 |
| 4.89 | 72.1 |
| 5.86 | 70.5 |

3.2 基于傅里叶逆变换的信号重构仿真

根据式(15),井下信号的重构函数为

$$\left\{ \begin{array}{l} y(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[P_A(j\omega) - P_B(j\omega) \cdot H(j\omega)]}{1 - a^2 G^2(\omega) \cdot e^{-j2\omega t}} e^{j\omega t} d\omega \\ P_A(j\omega) - P_B(j\omega) \cdot H(j\omega) = \\ \{ p_A(t) - p_B(t) * \frac{a\omega_b}{\pi} \text{Sa}[\omega_b(t - \tau_0)] \} \end{array} \right. \quad (20)$$

通过 MATLAB 数值仿真得到的重构波形见图 4。图 4(a)中已无泵干扰信号,说明通过延迟差动检测从理论上可以有效地消除泵干扰的影响。图 4(b)的重构信号与 DPSK 原信号的变化规律一致,整体波形没有失真,说明通过傅里叶逆变换方法得到的重构信号质量相对要好于时域差分方程法,但两种重构方法都可以有效恢复井下信号。

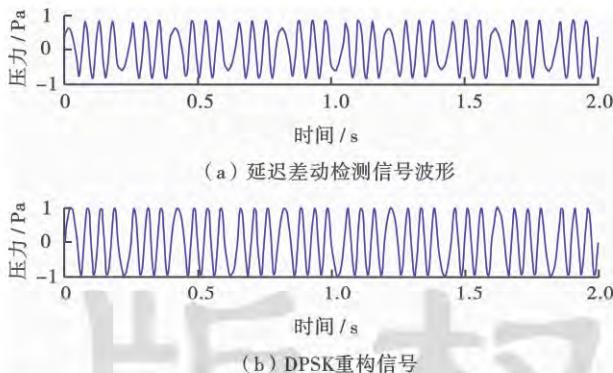


图4 基于傅里叶逆变换的钻井液压力 DPSK 信号重构

Fig. 4 Reconstruction of drilling fluid pressure DPSK signal based on inverse fourier transform method

数值仿真表明,如果将井下噪声加入 DPSK 源信号,两种方法的重构信号为井下噪声与 DPSK 信号的线性叠加,重构的井下信号信噪比没有变化,与式(12)和式(15)的理论分析相符。

4 结 论

(1) 理论分析与数值仿真表明,延迟差动检测法

可以有效地去除泵干扰的影响,通过时域和频域的数学模型均可实现钻井液压力相移键控信号的重构与恢复,信号的信噪比(SNR)大幅提高,在测量直管路不长的情况下,两种重构方法均可得到较满意的信号质量。

(2) 为避免极点频率进入信号频带对频域重构带来严重影响,压力传感器之间的测量直管路长度应根据最高信号频率及最小波速确定。

(3) 根据延迟差动检测的数学原理分析,该方法仅适用于与井下信号流向相反的特定干扰(泵干扰)的消除与抑制。对于钻井液连续压力波信号,由于其频带传输的特点极易受到泵干扰的严重影响,因此该方法对于泵干扰问题的解决具有一定的启示作用。

参 考 文 献

- [1] Marvin G, Kelly A Z, Orien M K. Mud pulse MWD systems report [J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33(12): 2301-2306.
- [2] Hutin R, Tennent R W, Kashikar S V. New mud pulse telemetry techniques for deepwater applications and improved real-time data capabilities[R]. SPE 67762, 2001.
- [3] Klotz C, Hahn D. Highly flexible mud-pulse telemetry:a new system [R]. SPE 113258, 2008.
- [4] Marsh J L, Fraser E C, Holt A L Jr. Measurement-while-drilling mud pulse detection process:an investigation of matched filter responses to simulated and real mud pressure pulses[R]. SPE 17787, 1988.
- [5] Brandon T L, Mintchev M P, Tabler H. Adaptive compensation of the mud pump noise in a measurement-while-drilling system [J]. SPE Journal, 1999, 4(2): 128-133.
- [6] Montaron B A, Hache J-M D, Voisin B. Improvements in MWD telemetry:"The right data at the right time" [R]. SPE 25356, 1993.
- [7] Martin C A, Philo R M, Decker D P, et al. Innovative advances in MWD[R]. SPE 27516, 1994.
- [8] Klotz C, Bond P, Wasserman I, et al. A new mud pulse telemetry system for enhanced MWD/LWD applications[R]. SPE 112683, 2008.
- [9] Foster M R, Patton B J. Apparatus for improving signal-to-noise ratio in logging-while-drilling system; US, 3742443[P]. 1973-06-26.
- [10] 孙学军,王秉钧.通信原理[M].北京:电子工业出版社,2001:29-30.
Sun Xuejun, Wang Bingjun. Principles of communication[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001: 29-30
- [11] 吴大正.信号与线性网络分析:下册[M].北京:高等教育出版社,1980:145-148.
Wu Dazheng. Analysis of signals and linear network: volume II [M]. Beijing: Higher Education Press, 1980: 145-148.
- [12] 吴镇扬.数字信号处理[M].北京:高等教育出版社,2004:174-201.
Wu Zhenyang. Digital signal processing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 174-201.
- [13] 李宗豪.基本通信原理[M].北京:北京邮电大学出版社,2006:44-48.

- Li Zonghao. Basic principles of communication[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006: 44-48.
- [14] 沈跃, 朱军, 苏义脑, 等. 钻井液压力正交相移键控信号沿定向井筒的传输特性[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 340-345.
- Shen Yue, Zhu Jun, Su Yinao, et al. Transmission characteristics of the drilling fluid pressure quadrature phase shift keying signal along a directional wellbore [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 340-345.
- [15] 刘修善. 钻井液脉冲沿井筒传输的多相流模拟技术[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 115-118.
- Liu Xiushan. Multiphase simulation technique of drilling fluid pulse transmission along well bore [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 115-118.
- [16] 刘修善, 苏义脑. 泥浆脉冲信号的传输速度研究[J]. 石油钻探技术, 2000, 28(5): 24-26.
- Liu Xiushan, Su Yinao. Study on transmission velocity of mud pulse signal [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2000, 28(5): 24-26.
- [17] 沈跃, 苏义脑, 李林, 等. 钻井液连续压力波差分相移键控信号的传输特性分析[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 593-597.
- Shen Yue, Su Yinao, Li Lin, et al. Analysis on transmission characteristics of differential phase shift keying signal of continuous pressure wave in drilling fluid channel [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 593-597.
- [18] Shen Yue, Su Yinao, Li Gensheng, et al. Numerical modeling of DPSK pressure signals and their transmission characteristics in mud channels [J]. Petroleum Science, 2009, 6(3): 266-270.
- [19] Shen Yue, Su Yinao, Li Gensheng, et al. Transmission characteristics of DPSK mud pressure signals in a straight well [J]. Petroleum Science and Technology, 2011, 29(12): 1249-1256.
- [20] 王秉钧, 冯玉琨, 田宝玉. 通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 36-37.
- Wang Bingjun, Feng Yumin, Tian Baoyu. Principles of communication [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 36-37.

(收稿日期 2012-09-03 改回日期 2012-12-17 编辑 王培玺)

中国石油学会《石油学报》2012 年优秀论文获奖名单

《石油学报》作为中国石油学会主办的高级别科技期刊, 肩负着代表中国石油行业上游业务最高学术及技术水平、引领中国石油上游科技发展方向、宣传中国石油上游科技成果的重要责任。为鼓励及发表更多更好的高水平论文及创新成果, 参照期刊影响因子的评价原理, 中国石油学会根据《石油学报》发表论文的被引次数, 评选出前 2 年即 2010 年发表论文中的高被引论文的前 10 篇论文作为 2012 年《石油学报》优秀论文, 特颁发“中国石油学会《石油学报》优秀论文获奖证书”及奖金 5000 元人民币, 以资鼓励。

2012 年《石油学报》优秀论文获奖名单如下:

1. 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 包书景, 刘鑫金. 四川盆地地下志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析. 石油学报, 2010, 31(2): 225-230.
2. 何登发, 陈新发, 况军, 袁航, 吴晓智, 杜鹏, 唐勇. 准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景. 石油学报, 2010, 31(1): 1-11.
3. 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 罗毅, 张学丰. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
4. 朱伟林. 南海北部深水区油气地质特征. 石油学报, 2010, 31(4): 521-527.
5. 窦伟坦, 刘新社, 王涛. 鄂尔多斯盆地苏里格气田地层水成因及气水分布规律. 石油学报, 2010, 31(5): 767-773.
6. 张功成. 南海北部陆坡深水区构造演化及其特征. 石油学报, 2010, 31(4): 528-533.
7. 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 刘洪林, 魏伟, 罗跃, 李伍, 方俊华. 中国页岩气研究现状与发展趋势. 石油学报, 2010, 31(4): 689-694.
8. 朱光有, 张水昌, 张斌, 苏劲, 杨德彬. 中国中西部地区海相碳酸盐岩油气藏类型与成藏模式. 石油学报, 2010, 31(6): 871-878.
9. 蔡东梅, 孙立东, 齐景顺, 董景海, 朱映康. 徐家围子断陷火山岩储层特征及演化规律. 石油学报, 2010, 31(3): 400-407.
10. 曾保全, 程林松, 李春兰, 袁帅. 特低渗透油藏压裂水平井开发效果评价. 石油学报, 2010, 31(5): 791-796.

中国石油学会

2012 年 12 月 31 日