

# 钻柱信道中声信号传输的接收特性分析\*

李 成<sup>1,2</sup>, 刘 钊<sup>1,2</sup>, 樊尚春<sup>1,2</sup>, 井中武<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室 北京, 100191)

(2. 北京航空航天大学惯性技术重点实验室 北京, 100191)

**摘要** 针对周期性管结构信道特征, 构建钻柱内一维低频纵波传输的有限差分模型, 应用单个加速度传感器作为声接收器, 在时、频域仿真分析了换能器接收位置对声信号传输特性的影响规律。在此基础上, 考虑信道内多重回波对声通信信号检测的影响, 基于信道容量的分析, 引入上、下行信道的单位脉冲激励响应, 设计了一种基于双声接收器模式的回波噪声抑制方法, 并利用倒频谱解析算法, 求解接收信号中的回波信息, 分析了单、双接收器工作模式下信道响应特征。数值仿真结果表明, 双接收模式可有效抑制井下回波噪声, 改善信噪比, 从而实现更佳的信息接收性能。

**关键词** 钻柱; 周期结构; 噪声; 声接收特性; 回波抑制

**中图分类号** O421; TB53

## 引 言

在石油钻探过程中, 随钻测井 (logging while drilling, 简称 LWD) 已成为井下动态参数实时测量的主要形式<sup>[1-2]</sup>。目前, 井下数据传输主要为有线传输和无线传输<sup>[3]</sup>, 由于电缆、光缆等有线传输方式存在连接可靠性较差、结构复杂、成本较高等不足, 井下无线传输技术受到广泛的重视与发展。传统的随钻测井传输方式为泥浆脉冲和极低频电磁波地层传输, 但载波频率分别低于 100 Hz 和 30 Hz, 限制了传输速率。相对于传统的无线传输方式, 低频声波传输技术因具有不受地层影响、能够获得 100bit/s 的较高传输速率、前期投入较少、可广泛应用于海洋井和陆地井等优点, 近年来受到国内外石油界日益广泛的关注, 成为随钻测井技术的研究热点<sup>[4-5]</sup>。钻柱信道具有的周期性结构、振动噪声以及声阻抗不匹配造成的多重回波都影响钻柱内声传输特性, 导致不同位置处接收信号响应差异明显, 从而制约声信号接收器的结构设计<sup>[6]</sup>。为此, 笔者针对钻柱的周期性管结构特征, 从信道响应的角度, 仿真分析了单、双接收器模式下声信号接收特性及对声通信信号检测的影响。

## 1 周期性信道内声波传输模型

在随钻测井声波遥测过程中, 井下的测量信息以低频纵波为传输载体, 通过钻杆、接箍组成的具有周期性结构的钻柱系统传输到地面附近的接收设备中。图 1 为钻柱信道的结构示意图。由于声波传播不具有方向性, 在钻柱内存在有与信号  $x(t)$  传输方向一致的上行波及相反方向的下行波。

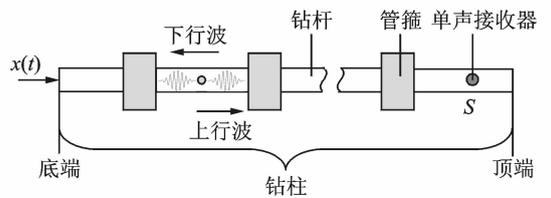


图 1 钻柱信道结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of drillstring channel

基于上述模型, 应用有限差分法, 定义  $\Delta m$  为钻柱微元质量,  $u_n^j$  为  $j$  时刻位置微元  $n$  处的质点位移, 则

$$u_n^{j+1} + u_n^{j-1} = \frac{2\Delta m_{n+\frac{1}{2}}}{\Delta m_{n+\frac{1}{2}} + \Delta m_{n-\frac{1}{2}}} u_{n+1}^j + \frac{2\Delta m_{n-\frac{1}{2}}}{\Delta m_{n+\frac{1}{2}} + \Delta m_{n-\frac{1}{2}}} u_{n-1}^j \quad (1)$$

\* 国家自然科学基金资助项目(50905095, 61121003)  
收稿日期: 2012-05-07; 修回日期: 2012-07-02

由此可获得忽略阻尼影响条件下钻柱信道内声信号传输特性。

## 2 不同模式下声信号接收特性

### 2.1 单接收器工作模式

以4节钻杆3节管箍组成的周期性管信道为例,表1为仿真信道结构参数。

表1 钻柱信道结构参数

Tab.1 Physical dimension of drillstring channel

名称	横截面积/ $10^{-3} \text{ m}^2$	长度/m
钻杆	3.39	8.55
管箍	16.2	0.475

周期性信道具有通阻带交替的梳状滤波器频谱特性,根据驻波理论,当声接收器分别位于 $(2n-1)\lambda/4$ 和 $n\lambda/2$ 处时( $\lambda$ 为载波波长, $n$ 为正整数,取值为1,2,⋯),信道具有不同的响应特性。对于表1所述结构的钻柱信道,以通带内频率1520 Hz作为载波频率为例,施加10个载波周期的正弦脉冲激励。当 $n=1$ 时,图2,3为不同位置处时域接收信号。纵坐标“幅值”为无量纲归一化后结果。

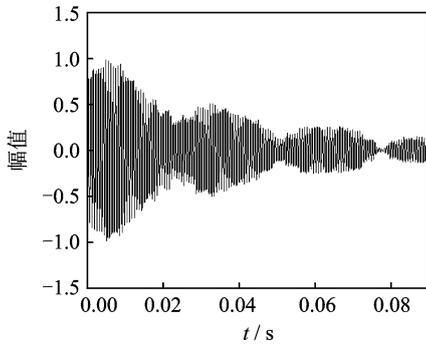


图2 距端面 $\lambda/4$ 处接收信号

Fig.2 Received signal at the position  $\lambda/4$  from end face

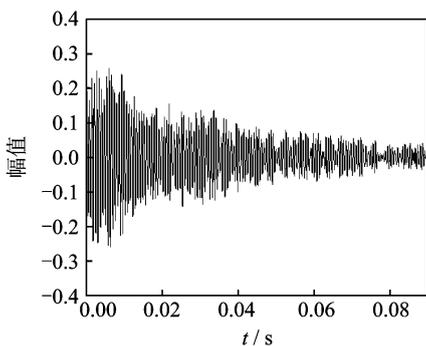


图3 距端面 $\lambda/2$ 处接收信号

Fig.3 Received signal at the position  $\lambda/2$  from end face

由图2和图3可知,当单接收器工作在距离图1中顶端端面 $\lambda/4$ 处时,接收信号包络明显且强度较高;当工作在距顶端端面 $\lambda/2$ 处时,接收信号衰减严重且信号波形存在明显毛刺,不利于声通信信号检测。因此在单接收器模式下,声接收器通常距端面为 $(2n-1)\lambda/4$ 。

### 2.2 双接收器工作模式

在随钻测井过程中,不仅钻柱的周期性结构会导致声波传输存在色散和多重回波现象<sup>[7]</sup>,信道内振动噪声也严重影响声信号接收性能。在信道中通常存在两种噪声:a.由井下钻头击破岩层所产生的钻头噪声 $n_b$ ,钻头噪声通过钻杆信道传输,然后通过多种途径传到地面;b.由地面设备的电力或机械系统等引起的地面噪声 $n_s$ 。由于 $n_s$ 距离钻柱顶端处的接收器较近,影响也更明显,根据上行信道的信道容量表达式<sup>[8]</sup>为

$$C_{UL} = \int_B \log_2 \left( 1 + \frac{P_s(f)}{P_{n_b}(f) + P_{n_s}(f) |H(f)|^{-2}} \right) df \quad (2)$$

其中: $B$ 为通带带宽; $P_s(f)$ , $P_{n_b}(f)$ 与 $P_{n_s}(f)$ 分别为传输信号 $x(t)$ 、钻头噪声 $n_b$ 和地面噪声 $n_s$ 的功率谱密度。

考虑到信号沿几千米长钻柱传输,能量衰减很大,可取 $|H(f)| \leq 1$ ,则 $|H(f)|^{-2} \geq 1$ 。由式(2)可知,若 $P_{n_b}(f)$ 与 $P_{n_s}(f)$ 为同一量级,则 $P_{n_b}(f)$ 可忽略,即地面噪声影响远大于井下噪声<sup>[9]</sup>。在钻柱信道内单接收器不仅接收到上行数据信号,也接收到下行地面噪声和多重回波。考虑到地面噪声 $n_s(t)$ 和激励信号 $x(t)$ ,在邻近地面的一节钻杆上安装两个声接收器,以实现地面噪声和图1中底端面反射回波的抑制。

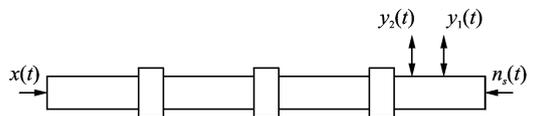


图4 双接收器结构示意图

Fig.4 Structure diagram of dual-receiver mode

图4为双接收器法的结构示意图。根据信道输入与输出之间的关系,则有

$$r(t) = x(t) * h(t) + n_s(t) \quad (3)$$

其中: $x(t)$ 为输入信号; $r(t)$ 为接收信号; $n_s(t)$ 为地面噪声; $h(t)$ 为信道的单位脉冲响应。

仅在钻柱底端(图4中左端)施加单位脉冲激

励,接收器  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$  处的脉冲响应分别为  $h_1(t)$  和  $h_2(t)$ 。同理,在顶端(图4右端)施加单位脉冲激励,两个接收器处脉冲响应分别为  $h'_1(t)$  和  $h'_2(t)$ ,则双接收器的时、频域信号可分别表示为

$$\begin{cases} y_1(t) = x(t) * h_1(t) + n_s(t) * h'_1(t) \\ y_2(t) = x(t) * h_2(t) + n_s(t) * h'_2(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Y_1(f) = H_{X_1}(f)X(f) + H_{N_1}(f)N_s(f) \\ Y_2(f) = H_{X_2}(f)X(f) + H_{N_2}(f)N_s(f) \end{cases} \quad (5)$$

解式(4)和式(5),可得

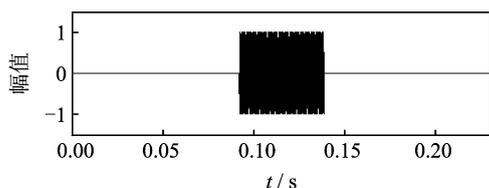
$$\begin{cases} X(f) = \frac{H_{N_2}(f)Y_1(f) - H_{N_1}(f)Y_2(f)}{D(f)} \\ D(f) = H_{X_1}(f)H_{N_2}(f) - H_{X_2}(f)H_{N_1}(f) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $H_{X_1}(f)$ ,  $H_{X_2}(f)$ ,  $H_{N_1}(f)$ ,  $H_{N_2}(f)$  分别为  $h_1(t)$ ,  $h_2(t)$ ,  $h'_1(t)$ ,  $h'_2(t)$  的频域形式。

由此可消除管箍和端面造成的回波影响。参见图4,仍以4节钻杆3节接箍的钻柱结构为仿真信道,取左端为自由端,右端为固定端,载波频率为1520 Hz,接收器  $y_1$  距钻柱端面0.95 m,接收器  $y_2$  距钻柱端面1.90 m,两接收器相距0.95 m,在左端处施加时长为5000 dt(约0.0465 s)的正弦激励信号,并考虑右端耦合地面噪声的信噪比  $SNR = 4$  dB。由于双接收器的位置不同,造成相同条件下噪声信号接收时长不完全相同,因此利用有限长单位脉冲响应数字带通滤波器对双接收器信号进行处理,以实现较好的接收效果。

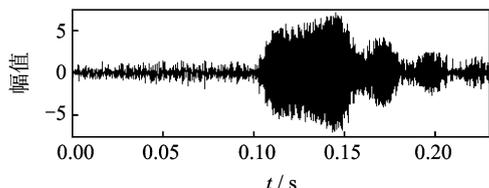
以单接收器  $y_1$  为例,图5为经50阶FIR滤波器处理后的单、双接收器接收信号波形。图5(d),5(e)为离散傅里叶变换结果,纵坐标以无量纲“DFT”表示。根据图5(b),因接收信号中存在回波噪声,单接收器  $y_1$  接收信号和原始激励信号相差很大,且存在明显的噪声包络。结合图5(d)和5(e),经双接收器处理后的接收信号与激励信号波形基本吻合,且频域信号主瓣明显、毛刺较少,幅度也与激励信号接近,能够较好地实现激励信号的恢复提取。图5(c)也表明,双接收器的时域接收信号中仍存在部分回波影响,其经傅里叶反变换求解后,反求的输出信号中产生较严重的杂波“拖尾”现象,导致信号首尾部分无法有效使用,影响后续声通信信号的有效提取。

为此,使用窗函数对接收信号进行信号处理,截除反射回波,以消除“拖尾”影响,从而增大接收信号中首达波的能量强度。鉴于图基窗是一种平顶余弦窗,可在有效截断首尾两段杂波的同时,保留中间段的有效波形。笔者选取了上升沿(下降沿)长度为0.0174 s,总时长为0.2315 s的图基窗进行时域接



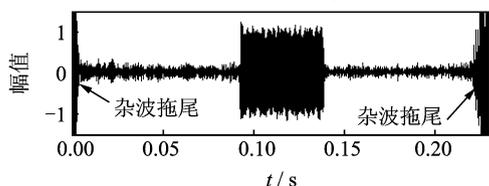
(a) 发射激励信号

(a) The excitation signal



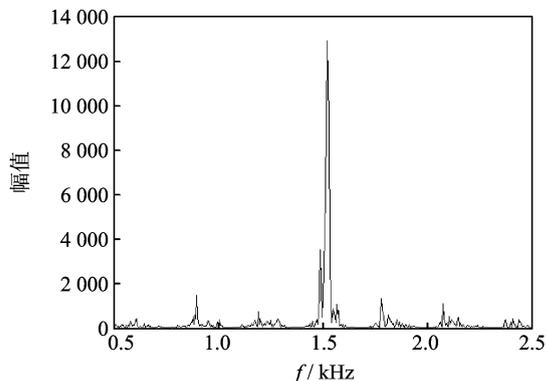
(b) 单接收器  $y_1$  时域信号

(b) The received time-domain signal at the receiver  $y_1$



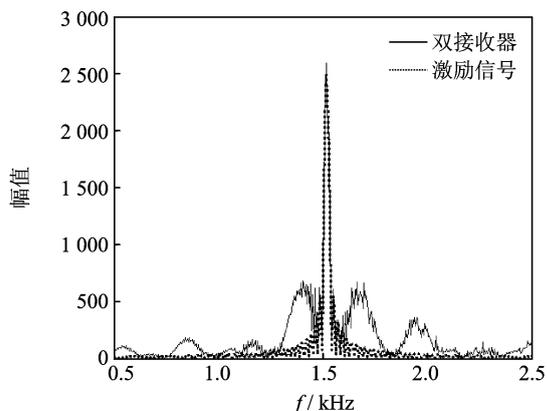
(c) 双接收器时域信号

(c) The received time-domain signal in dual-receiver mode



(d) 单接收器  $y_1$  的频域接收信号

(d) The received frequency-domain signal at the receiver  $y_1$



(e) 双接收器的频域接收信号

(e) The received frequency-domain signal in dual-receiver mode

图5 单、双接收器接收信号

Fig. 5 The received signal in either single-or dual-receiver mode

收信号截取,并对截取后数据施加双接收器回波抑制算法,结果如图 6 所示。

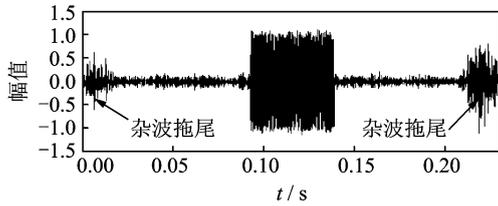


图 6 处理后的双接收器时域接收信号

Fig. 6 The received time-domain signal after processing in dual-receiver mode

比较图 5(c)和图 6 可知,应用窗函数后,反求的接收信号中首尾两端的杂波幅度明显减小,则回波噪声在一定程度上得到了抑制,从而提高接收信号的信噪比。

### 2.3 接收信号的倒谱分析

谱峰检测法是目前最常用的信号瞬时频率估计检测方法<sup>[10]</sup>,其中倒谱可将频谱图上成簇的边频带谱线简化为单根谱线而广泛用于地震波检测、回声处理等领域<sup>[11]</sup>。由于钻柱结构的周期性特征及声阻抗不匹配性,信道内存在多重回波且影响严重,因此引入倒谱技术分析接收信号的回波延时峰,以验证单、双接收器工作模式下声信号接收性能。利用 MATLAB 工具中倒频谱函数  $cceps(x)$ ,对图 5 中单接收器  $y_1$  的仿真接收信号进行倒频谱处理。如图 7 所示,由于单接收器工作模式对接收信号不具有方向性,接收信号在端面和管箍等声阻抗突变处存在较强多重回波,形成密集谱线,导致倒谱信号的谱线较多且淹没于噪声信号中。

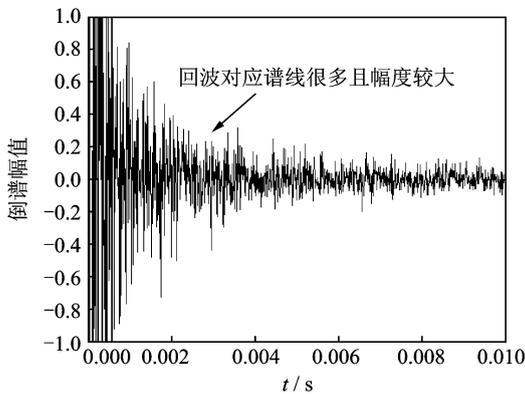


图 7 单接收器  $y_1$  接收信号的倒谱

Fig. 7 The cepstrum curve of received signal at the receiver  $y_1$

图 8 为相同情况下双接收器接收信号的倒谱曲线。可见,图中谱线明显减少和稀松,且幅值也显著减弱。为进一步比较不同接收模式下信号强度,设激励信号的时长为  $T$ ,取接收信号  $y(t)$  中自直达波起  $T$  时长的有效接收信号为  $y_s(t)$ ,则表征单、双接收器工作模式下声信号的接收性能  $\eta$  可定义为

$$\eta = 10 \lg \left| \frac{Y_s(\omega)}{Y(\omega) - Y_s(\omega)} \right| \quad (7)$$

其中: $Y(\omega)$ 为接收信号  $y(t)$  的总功率谱; $Y_s(\omega)$ 为有效接收信号  $y_s(t)$  的功率谱。

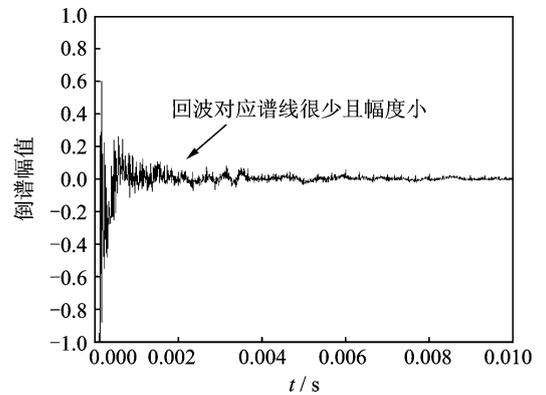


图 8 双接收器接收信号的倒谱

Fig. 8 The cepstrum curve of received signal in dual-receiver mode

结合图 5 和图 6,根据式(7)可知,在单接收器工作模式下  $\eta = 5.11$  dB,在双接收器工作模式下  $\eta = 13.32$  dB。由于在式(7)中, $Y(\omega) - Y_s(\omega)$ 实际上反映了接收信号中回波与噪声成分,因此在相同工作条件下双接收器检测方式使信噪比增加了  $(13.32 - 5.11) / 5.11 \times 100\% = 160.67\%$ 。数值仿真结果表明,双接收器工作模式能够较好地实现钻柱信道中回波和地面噪声的抑制,明显提高信噪比,改善声信号接收性能。

### 3 结束语

基于周期性管结构钻柱信道,对不同单、双接收器模式下信道内声信号接收特性进行了仿真研究。结果表明,在距端面  $1/4$  载波波长的接收位置处,单接收器可获得较好的信道响应效果。考虑到信道内多重回波和地面下行噪声的主要影响,提出了基于上、下行信道脉冲响应的双接收器工作模式。结合 FIR 数字带通滤波器和窗函数法,通过截断回波信

号减小回波“拖尾”以消除残余回波噪声。利用倒谱方法对单、双接收器的接收信号进行分析,验证了双接收器在回波抑制中的作用,从而有助于提高信噪比,改善声信号接收性能。

### 参 考 文 献

- [1] Kull B J, Duff R G., Clarke A J, et al. Distributed downhole measurements describe salt drilling while underreaming[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2010, 62(2): 44-47.
- [2] Russell R, Hernandez M, MacNeill D, et al. “Intelligent” wired drill-pipe system allows operators to take full advantage of latest downhole sensor developments [C]//International Petroleum Technology Conference. Kuala Lumpur: International Petroleum Technology Conference, 2008: 1659-1665.
- [3] 刘新平,房军,金有海. 随钻测井数据传输技术应用现状及展望[J]. *测井技术*, 2008, 32(3): 249-253.  
Liu Xinping, Fang Jun, Jin Youhai. Application status and prospect of LWD data transmission technology [J]. *Well Logging Technology*, 2008, 32(3): 249-253. (in Chinese)
- [4] 蔡小庆. 基于周期性钻柱系统的随钻数据声波传输方法研究[D]. 东营:中国石油大学, 2009.
- [5] Harper G, Almanza E A, Finley D, et al. Implementation of advanced acoustic telemetry system adds value and efficiency to well testing operations [C]//SPE-Asia Pacific Oil and Gas Conference. Jakarta: Society of Petroleum Engineers, 2003: 606-620.
- [6] Li Cheng, Ding Tianhuai, Wang Peng. An experimental rig for near-bit force measurement and drillstring acoustic transmission of BHA[J]. *Measurement*, 2011, 44(4): 642-652.
- [7] 李成,丁天怀,陈恳. 周期性管结构信道的声传输方法分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(2): 12-16.  
Li Cheng, Ding Tianhuai, Chen Ken. Analysis of acoustic transmission method in the periodic cascade channel with its application to drill pipes [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(2): 12-16. (in Chinese)
- [8] Sinanovic S, Johnson D H, Shah V V. Data communication along the drill string using acoustic waves [C]//International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Montreal: [s. n.], 2004: 909-912.
- [9] Gao L, Gardner W, Robbins C, et al. Limits on data communication along the drillstring using acoustic waves [J]. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2008, 11(1): 141-146.
- [10] 刘小峰,柏林,彭春阳. 基于瞬时参数估计的信号分量提取[J]. *振动、测试与诊断*, 2011, 31(1): 32-35.  
Liu Xiaofeng, Bo Lin, Peng Chunyang. Signal component extraction using instantaneous parameters estimation [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2011, 31(1): 32-35. (in Chinese)
- [11] 郑济均,林竞力,朱维乐. 基于倒谱分析的 OFDM 信道估计方法[J]. *电子科技大学学报*, 2011, 40(4): 509-511.  
Zheng Jijun, Lin Jingli, Zhu Weile. Equalization method for OFDM system based on cepstrum analysis [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2011, 40(4): 509-511. (in Chinese)



**第一作者简介:**李成,男,1977年5月生,博士、副教授。主要研究方向为先进传感与智能仪器、振动测试技术。曾发表《An experimental rig for near-bit force measurement and drillstring acoustic transmission of BHA》(《Measurement》2011, Vol. 44, No. 4)等论文。

E-mail: licheng@buaa.edu.cn