

文章编号: 2096-1618(2019)04-0380-04

# 面向随钻测量的泥浆压力信号脉冲识别研究

蔡鹏飞, 张斌

(成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**在基于泥浆压力波传输信号的随钻测量系统中,波形受到与信号频段重叠的噪声干扰。这些干扰无法通过传统的带通滤波消除,严重影响信号脉冲的识别与定位。根据泥浆压力脉冲的特点,提出一种新的脉冲识别与准确定位的方法,通过滑动的方式检测脉冲波形与基线之间所包含的面积来确定同步脉冲,可以有效减少带内噪声的影响。实验对一组钻井施工现场数据进行脉冲识别与解码,结果表明所提方法的误码率是6.1%,明显低于目前业内领先的一款商业软件的误码率(13.5%)。

**关键词:**随钻测量;泥浆压力脉冲;脉冲识别;同步

**中图分类号:**TN919

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2019.04.010

## 0 引言

智能钻井将高速发展的信息技术与传统的钻采工艺相结合,能够实现复杂的井眼轨迹,将传统钻采工艺无法开采的油气资源开采出来,从而极大提高油气产量<sup>[1-4]</sup>。为了在钻井过程中准确控制井眼轨迹,智能钻井需要采用随钻测量系统(measurement while drilling, MWD),将钻头附件的方位信息和智能钻头的状态信息通过电磁波、超声波或泥浆压力波传回地面,由地面系统接收处理后,产生新的钻井控制命令,完成井眼轨迹的闭环控制。泥浆又称钻井液,流淌于钻杆连接而成的钻柱内(钻杆内部是空心的)。相对于利用电磁波和超声波传输信号,基于泥浆压力脉冲的MWD传输信号受电磁和钻具震动干扰小,在实践中得到广泛应用<sup>[4]</sup>。

基于泥浆压力脉冲的MWD在钻头附近安装有耐井下高温的传感器和单片机数据采集系统。该系统将采集到的数据进行编码<sup>[5-7]</sup>,形成数据帧。单片机同时控制一个电磁阀的机械动作,增加或减少钻柱内泥浆流动横截面积,从而改变泥浆压力。单片机信息发送系统根据数据帧的内容,调制泥浆压力,产生压力脉冲。压力脉冲经钻柱从井下传到地面,地面系统通过压力传感器将压力脉冲转换成电脉冲,经过滤波解码后即可还原出数据帧的内容<sup>[4]</sup>。

电脉冲经FIR数字滤波<sup>[8-10]</sup>后,信号频带以外的噪声(高频)和基线漂移(低频)可以被滤除,但是与信号噪声频带重叠的噪声和基线漂移(简称带内噪声和基线漂移)却无法被滤除。带内噪声和基线漂移主要来源于泥浆泵开关泵的影响、钻井孔道和地层复杂性的影响等<sup>[11]</sup>。带内噪声和基线漂移严重影响信息脉冲的识别

和在时间轴上的定位,增加解码过程中的误码率。

消除基线漂移的传统方法有:多段拟合去除基线、均值算法去除基线等<sup>[12-14]</sup>。将这些方法应用于泥浆压力脉冲波时,误码率高,效果不理想。带内噪声目前则无普遍适用的消除方法。为解决这些问题,针对MWD数据帧中不同的泥浆脉冲类型提出了不同的检测识别方案。在检测识别脉冲的过程中应用这些方案,可以消除或减少带内噪声和基线漂移的影响。

## 1 数据帧和泥浆脉冲

数据帧格式如图1所示。每一帧包括数量可配置的时间槽。每一个时间槽的时间长度经配置后,在传输过程中是固定的。该时间越短,则信号传输的频率越快。根据泥浆压力脉冲发生器的机械性能,时间槽宽可配置在0.2~2s。为分辨不同的脉冲,紧邻的两个时间槽不能同时被脉冲占据(同步脉冲除外)。除同步脉冲外,泥浆压力脉冲发生器根据编码,在相应时间槽的位置产生宽度为1.5个时间槽宽的压力脉冲。其中多余的0.5个时间槽宽是为了补偿脉冲在传输过程中信号宽度的衰减。泥浆压力脉冲所占据的时间槽位代表了传输的数字信息(时间槽位上如有脉冲则该位为逻辑“1”,否则为“0”)。因此,地面接收系统通过压力传感器和脉冲波峰检测软件还原所接收到的脉冲时间槽位,就可以还原脉冲所携带的数字信息。



图1 数据帧格式和编码脉冲

步脉冲后,就可以计算时间起点和其后每一个时间槽的边界位置。同步脉冲占据3.5个时间槽位。紧接同步脉冲的是帧识别段(frame identification, FID)。采用组合码进行编码<sup>[5]</sup>。FID段一共占据15个时间槽,3个脉冲选择占用这15个时间槽中的3个槽位,共有84种组合(其中有部分是不合规则的组),记为3/15编码。每一种有效组合代表一个常用的数据帧结构。地面接收系统收到FID后,就可以知道FID后有哪些数据段,每一段包括多少时间槽,代表什么物理参数。数据帧中FID之后是FID所定义的若干数据段,每一段的编码和FID类似,只是时间槽和脉冲的数量有变化。

尽管编码脉冲是方波,在传输过程中,由于泥浆介质存在低通滤波的性能,并且地面接收系统为了滤除传输过程中叠加在信号上的噪声也会设置FIR滤波器,因此地面接收系统最后得到的不再是方波脉冲,而是经过滤波的边沿平滑的脉冲。方波序列经FIR滤波处理后所得的脉冲如图2所示。

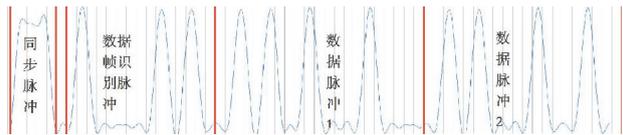


图2 经FIR滤波后的数据帧脉冲

通过检测滤波后脉冲序列波峰所在时间槽位,就可以解码传输的信息。然而,和一般环境下的通信不同,在随钻测量过程中,泥浆压力波动很大,加上复杂的地质环境,因此信号脉冲通常会经历严重的基线波动、脉冲变形和噪声干扰。在脉冲频段之外的基线波动和噪声可以通过滤波消除,但是对于和脉冲频段重叠的噪声和基线干扰则无法通过滤波消除。这些干扰会造成“伪波峰”,从而影响对数据帧的解码。

消除信号频段内的“伪波峰”,可以充分利用帧格式信息。其原理是:数据帧的编码加入了冗余的检错信息,每一个数据段有设定的脉冲个数,脉冲之间的槽位距离要满足设定的规则,同步脉冲有特殊的宽度。在一个序列的波峰中,根据信号强度和编码规则,选择有效波峰,忽略其他波峰。最后的解码结果还需要进行奇偶校验,校验不通过的数据帧被舍弃。由于钻进速度相对较慢,因此对于钻进状态的信息可以通过重复发送(无须接收方请求)确保地面系统能够在高误码率的情况下获取钻头附近的钻进状态信息。

## 2 脉冲识别检测

### 2.1 同步脉冲检测

提出“滑动窗口面积阈值法”用以消除基线波动,从而检测同步脉冲。如图3所示的曲线是地面接收系统接收到的经过滤波后的压力波。该压力波由一系列

离散的数据点  $V_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$  组成。滑动窗口包括一个矩形和以其为中心沿水平方向延展的两条平行线段。矩形用以锁定同步脉冲,而两条平行线段分别用于确定同步脉冲附近信号的最大值和最小值。滑动窗口包括  $n$  个数据点,而矩形包括  $w$  个数据点,其中  $n$  和  $w$  是固定的。窗口上下高度分别为  $h_{top}$  和  $h_{bot}$ ,两者之差为  $w$ 。在窗口滑动过程中, $h_{top}$  和  $h_{bot}$  是动态变化的,从而矩形的面积  $S = hw$  也相应改变。定义脉冲面积  $S_p$  为图3中所示的阴影区域,即:

$$S_p = \sum_{i=\frac{n}{2}-\frac{w}{2}}^{\frac{n}{2}+\frac{w}{2}} (V_i - h_{bot}) \quad (1)$$

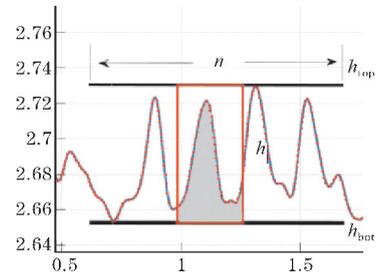


图3 滑动窗口示意图(阴影为脉冲面积)

此定义减少了基线波动对脉冲面积的影响。实践中还发现,相对于简单的通过计算波峰和波谷之间包络的曲线面积来确定脉冲面积的方法,方法可以有效地减少因脉冲变形和噪声干扰引起的脉冲粘连效应。

由于设定同步脉冲宽度(3.5个时间槽)比其他脉冲宽度(1.5个时间槽)大,因此设定脉冲面积阈值  $th$ ,使同步脉冲的面积大于  $th$ ,而其他脉冲面积小于  $th$ 。不断滑动窗口,直到  $S_p > th$ ,即可判定此时同步脉冲在矩形内。继续滑动窗口,直到  $S_p$  达到极大值(判定规则是: $S_p$  随窗口右移开始增大,然后转为减小,转折点即为极大值点)。当  $S_p$  达到极大值时,算法判定同步脉冲在矩形中心,由此即可准确判定时间起点,实现信号同步,如图4所示。

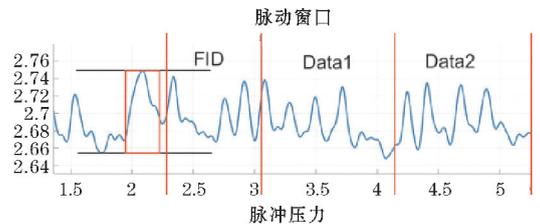


图4 滑动窗口识别同步脉冲(矩形内)

### 2.2 FID和数据段脉冲检测

时间起点确定后,即可确定数据帧各时间槽的边界位置(时间槽宽是固定的)。FID和数据段采用的脉冲宽度相同。需要确定每个脉冲波峰所在的时间槽位。采用寻找波形极大值方法检测波峰。波峰的判据是:在波峰位置  $i$  处,有

$$V_i > V_{i-1} \text{ 且 } V_i > V_{i+1} \quad (2)$$

以一段 3/15 编码的波形为例,根据式(2)判定的波峰如图 5 所示。该段共有 15 个时间槽宽,理论上只包含 3 个脉冲,即 3 个波峰。但是,由于噪声和基线波动,波形中还包含 4 个“伪波峰”(第 2~5 个波峰)。将所有峰值排序,选取幅度最大的 3 个波峰,忽略其他波峰,即可去除“伪波峰”的干扰。有效的 3 个波峰位置如图 6 所示。如果一个时间槽内有波峰,则该槽位编码为逻辑值“1”(波形下方绿点),否则为“0”(红点)。图 6 中 15 个时间槽位上编码的数字信息为“01000000100100”。此编码仅为原始码。对原始码进行规则校验(两个“1”之间至少要有 1 个“0”,最后一位必须是“0”)和奇偶校验,未通过的判定为非法数据段。除 FID 段外,一段数据非法并不影响数据帧中其他数据段的解码。这样,可以尽量利用信道多传输数据。FID 和每一数据段拥有各自的“原始码-真实数据”转换表或转换公式。通过转换,即可将 FID 和各数据段的真实数据解码还原。

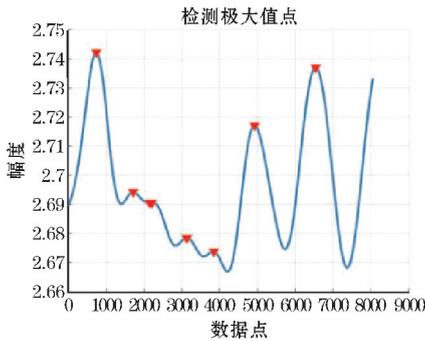


图 5 受噪声干扰的 3/15 组合码波形(三角形标注处是波峰)

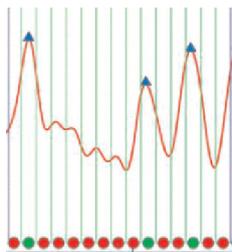


图 6 剔除伪波峰后的有效波峰(三角形标注处)

### 3 实验结果

用 MATLAB 实现了所提出的脉冲识别算法和解码方案。为了验证算法的有效性,采用 49 段钻井施工现场测量的时间长达 817 分钟的原始波形,作为解码软件的输入。作为对比,还利用一套商用泥浆压力解码软件对同样的原始波形进行解码。为便于对比,这两套解码软件除脉冲识别算法不同外,编码方式完全相同。

对原始波形总共 311 帧数据的识别中,解码软件有 19 帧未能识别或识别错误,误码率 6.1%;对比对象软件有 42 帧未能识别或识别错误,误码率 13.5%。软

件在识别率上明显优于对比对象。

对两套软件的解码结果分类讨论:

(1) 两套软件对同样的波形得出相同并且正确的解码结果,这类情形占有所有情形中的大多数。

(2) 软件解码结果正确,对比软件解码错误。择要介绍以下 3 种情形:

错误类型 a: 对比对象能够找到同步脉冲,但无法准确定位同步脉冲位置,因此无法准确判定时间起点,造成解码错误,如图 7 所示。对于该段波形,脉冲规则判断和奇偶校验显示解码错误。由于系统能够检错,因此该错误是良性的。

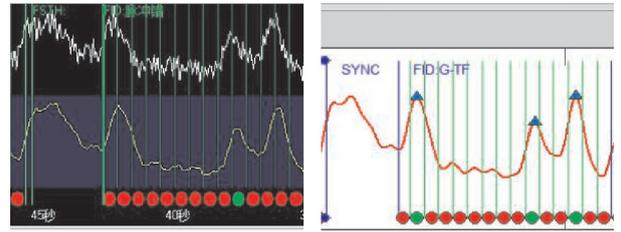


图 7 错误类型 a

错误类型 b: 对比软件能够正确定位同步脉冲,但是由于噪声干扰,导致数据脉冲识别错误,随后的检错算法能否发现该错误,如图 8 所示,对比软件未能检测出第 1 个脉冲波峰,由于系统能够检错,因此该错误是良性的。

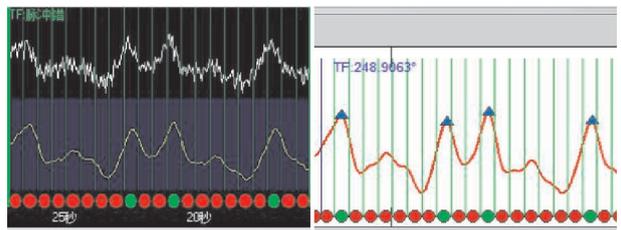


图 8 错误类型 a

错误类型 c: 对比对象能够正确定位同步脉冲,但是由于噪声造成的“伪波峰”,导致解码软件无法正确识别有效波峰,造成解码错误,如图 9 所示。该段波形解码结果 95.6 度是错误解码(正确结果已知为 109.6°),原因在于软件将图 9 中第 2 个绿点处脉冲波峰(“伪波峰”)识别为有效波峰。然而,该解码通过了规则判断和奇偶校验,因此系统无法检错,该错误是恶性的。

(3) 两套软件解码结果均错误。限于篇幅,不再详细分析。这说明本软件算法还有很大提升空间。

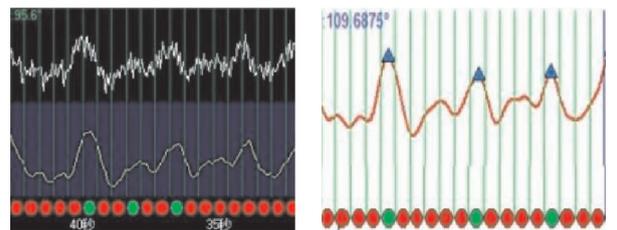


图 9 错误类型 c

## 4 结论

提出一种面向油气随钻测量的泥浆压力同步脉冲和有效数据脉冲识别算法。结合组合码编码,该算法能有效减少基线波动和噪声干扰的影响,提高对同步脉冲和有效数据脉冲的识别和准确定位。实验结果表明,对一组井场施工现场采集到的原始波形,本算法的解码误码率为6.1%,明显低于目前一款成熟商业软件的误码率(13.5%)。

## 参考文献:

- [1] 苏义脑, 窦修荣. 随钻测量, 随钻测井与录井工具[J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(1): 74-78.
- [2] 刘树坤, 汪勤学, 梁占良, 等. 国内外随钻测量技术简介及发展前景展望[J]. 录井工程, 2008, 19(4): 32-37.
- [3] Klotz C, Bond P R, Wassermann I, et al. A new mud pulse telemetry system for enhanced MWD/LWD applications[C]. IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [4] 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.
- [5] 尚晋, 戴有福, 杨晓峰, 等. 无线随钻仪脉冲编码技术研究[J]. 石油仪器, 2012, 26(2): 28-29.
- [6] 李安宗, 李传伟, 梁耀, 等. 密勒码在随钻测井高速泥浆脉冲遥测系统中的应用[J]. 测井技术, 2015, 39(1): 78-82.
- [7] Chen W Y, Fang B, Wang Y. MWD drilling mud signal De-noising and signal extraction research based on the pulse-code information [C]. Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 244-249.
- [8] Selesnick I W, Burrus C S. Generalized digital Butterworth filter design [J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 1998, 46(6): 1688-1694.
- [9] Jackson L B. Digital Filters and Signal Processing: With MATLAB® Exercises [M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [10] Li C. Design and realization of FIR digital filters based on MATLAB [C]. Anti-Counterfeiting Security and Identification in Communication (ASID), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 101-104.
- [11] Jianhui Z, Liyan W, Fan L, et al. An effective approach for the noise removal of mud pulse telemetry system [C]. Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI'07. 8th International Conference on. IEEE, 2007: 1971-1974.
- [12] Kaur M, Singh B, Ubhi J S, et al. Digital filtration of ecg signals for removal of baseline drift [C]. Proceedings of International Conference on Computer Communication and Management (ICCCM 2011), 2011.
- [13] 张勇, 张萍, 王介生. 心电图中心电图中滤除基线漂移的研究 [C]. 2006 年全国石油化工生产安全与控制学术交流大会, 2006: 465-468.
- [14] 朱伟芳, 齐春. 一种实用的去基线漂移滤波算法 [J]. 苏州大学学报 (工科版), 2006, 26(1): 62-64.

## Measurement while Drilling-oriented Identification of Mud Pressure Signal Pulse

CAI Pengfei, ZHANG Bin

(College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In mud-based telemetry of measurement while drilling (MWD) systems, the in-band noise cannot be filtered out by traditional band-limited filtering techniques, which will lead to significant degradation of signal pulse shape and severely affect the signal pulse identification and positioning for synchronization. This paper proposes a novel method for mud-pulse identification and positioning. The method determines the synchronization pulse by detecting the area contained between the pulse waveform and the baseline through sliding a window, and it can effectively reduce the influence of in-band noise. Experiments based on decoding of a series of mud pressure waves in real drilling environment show that the proposed method achieved an error rate of 6.1%, significantly lower than that of a leading commercial decoding software (13.5%).

**Keywords:** measurement while drilling; mud pressure pulse; pulse Identification; synchronization