

基于链路自适应的随钻无线通信信道质量评估研究

宋雷震^a, 吕东芳^b

(淮南联合大学 a. 智能制造学院; b. 信息工程学院, 淮南 232038)

摘要: 随钻测量技术是进行石油勘探的重要方法, 可以在钻井过程中对地下环境数据进行实时传输, 无线通信信道的质量直接影响整个信息获取的效果。为提高随钻测量信息传输, 提出一种通信信道质量评估方法。首先利用深度学习构建信道估计方法, 然后结合泵冲干扰消除算法, 构建基于加权因子信干噪比的信道质量评价指标。实验结果显示, 当信噪比为 15 时, 研究提出的基于 WSINR 的信道质量评价方法的实际误码率为 0.0003, 理论误码率为 0.00003, 整体误码率在合理范围内。由此说明, 研究提出的方法可以有效地应用于随钻通信信道的质量评估, 提高信息传输的质量和效率。

关键词: 链路自适应; 随钻; 无线通信; 信道; 质量评估

中图分类号: TE271

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)01-0141-08

Quality evaluation of wireless communication channels while drilling based on link adaptation

SONG Leizhen^a, LÜ Dongfang^b

(a. School of Intelligent Manufacturing; b. School of Information Engineering,
Huainan Union University, Huainan 232038, China)

Abstract: Measurement while drilling technology is an important method for petroleum exploration, which can transmit the underground environment data in real time during drilling. The quality of wireless communication channel directly affects the whole information acquisition effect. In order to improve the transmission of measurement information while drilling, a communication channel quality evaluation method is proposed. Firstly, the channel estimation method is constructed through deep learning, and then the channel quality evaluation index based on the weighted factor of signal-to-interference-noise ratio is constructed by combining the pump interference cancellation algorithm. The experimental results show that when the signal-to-noise ratio is 15, the actual error rate and can theoretical error rate of the proposed channel quality evaluation method based on WSINR are 0.0003 and 0.00003 respectively, and the overall error rate is within a reasonable range. This shows that the proposed method can be effectively applied to the quality evaluation of communication channel while drilling, and can improve the quality and efficiency of information transmission.

Key words: link adaptation; while drilling; wireless communication; channel; quality assessment

收稿日期: 2023-05-28

基金项目: 安徽省自然科学基金重点项目(2022AH052925); 2021 校级自然科学项目(LCY2201)

作者简介: 宋雷震(1980—), 男, 黑龙江双鸭山人。硕士, 副教授, 主要从事电气自动化方面的研究。E-mail: 56042485@qq.com。

随着经济社会的不断发展,石油资源在国家发展建设中的作用越来越突出,国际社会对石油资源的需求也更加迫切。随着石油开采的力度不断加大,石油资源的开发难度逐渐增大,基于这一目的,随钻测量技术(Measurement While Drilling, MWD)逐步被开发和利用^[1-2]。该技术采集井下的数据信息,利用无线网络传输至地面用于实时分析和判断。当下,该技术已经成为石油开采领域中的关键技术。MWD系统采用无线网络进行数据传输,由于市场需求和实际开采环境的变化,钻井效率和精度等要求不断被提高,这对MWD系统的数据传输技术提出了新的挑战^[2]。王小波利用电磁波随钻对煤矿井下水力钻井方式进行抽采,并利用查表补偿法和拟合函数对误差进行校准^[3]。韩冬等利用大规模多输入多输出无线通信技术改进链路的可靠性,结果显示该方法可以确保信号接收的质量,提高系统吞吐量^[4]。在无线通信系统中,无线通信信道会随着时间以及环境等因素的改变而发生变化,而且,在实际钻井过程中,受操作技术影响,MWD的数据传输性能会进一步受到限制,制约工作效率。为更好地提高信道通信质量,对钻井过程的数据进行实时传输,本研究从链路自适应角度考虑,首先构建基于深度学习的信道估计方法,然后利用该方法设计了基于加权因子信干噪比(Weighting Signal to Interference Plus Noise Ratio, WSINR)的信道质量评价方法,用于无线通信信道的质量评估,以期提高信道通信效率,为石油开采技术提供支持。该研究方法可对传输频点进行指导,以此解决石油开采施工现场面临的各种问题,或可以成为未来随钻测量连续脉波传输系统的实现基础。研究首先创新性地提出了一种基于深度学习技术的信道估计方法来改进传统信道估计方法的不足;其次,在考虑实际环境和噪声干扰的基础上,构建了一种WSINR的信道质量评估方法来更好地对信道质量进行分析。

1 基于加权信干噪比的无线通信信道质量评估方法构建

1.1 基于深度学习的信道估计方法设计

在进行通信信道质量评估时,信道估计是其关键内容,信道估计的效果直接影响信道质量评估的准确性。在对链路自适应的随钻无线通信信道进行估计时,利用随钻测量技术系统现有数据帧结构 Chirp 信号作为信道估计的训练序列^[5]。Chirp 信号是一种受时间影响不断改变频率的变化性信号,具有较好的自相关性和抗干扰能力,在语音、声呐以及雷达等系统中有广泛应用。Chirp 信号的数学模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} s(t) = A e^{f_0 t + \frac{1}{2} k t^2} \\ k = \frac{f_1 - f_0}{T} \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为频率; s 为信号; f_0 为起始频率; t 为时间; A 为信号幅值; T 为信号时宽; f_1 为终止频率; k 为调制信号的斜率。

现阶段相对普遍使用的信道估计方式是最小二乘法(Least Square Error, LS)和最小均方误差(Minimum Mean Square Error, MMSE),但这些方法对信息处理的数学模型有较高的要求,同时在面临部分非线性和非平稳性的系统时,其处理效果会受到严重影响。为解决上述信道估计方法在精度以及非线性系统中的不适用等问题,研究构建基于深度学习算法和长短时记忆网络(Deep Neural Network and Long Short-Term Memory, DNLSTM)的信道估计方法,并利用 Chirp 信号完成信道估计。DNLSTM 的主要结构包括信号消噪网络、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)、归并操作(Merge)以及信道估计构成^[6],具体结构如图1所示。

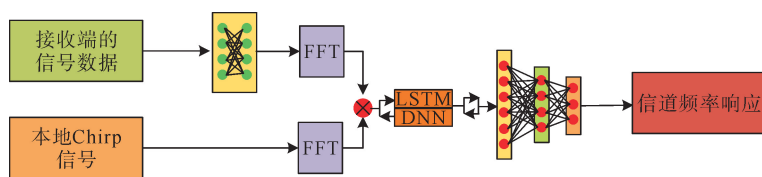


图1 DNLSTM网络具体结构

DNLSTM 结构以深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)和长短时记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)为主要结构。在该结构中,利用 Chirp 信号来估计通信信道的信息。其中,DNN 主要用于消除接收信号的噪声以及提取信号的全局特征。基于信道估计的特征,发射的信号在通过通信信道到达接收端时,会经历信号衰减和各种噪声影响,致使接收到的信号产生畸变而无法被准确识别。而 MWD 在面对钻井液无线信道传输时,受复杂的钻井工作环境影响,噪声问题会更加明显^[7]。在 MWD 系统中,不仅面临各种机械噪声,还要受到强烈的泵冲干扰。因此,DNLSTM 结构中包含一个消噪网络,由该模块的数据输出和训练序列相结合来构成整个模型的信道估计,如式(2)所示。

$$\hat{y} = f(\theta_d; x) \quad (2)$$

式中: \hat{y} 为该结构的输出值; x 为消噪网络的输入值; θ_d 为消噪网络中需要训练的参数值。

消噪模块的输出层包含 4 层网络结构,每层网络结构的神经元分别为 200、256、256 和 200,输入的数据维度为 128×200 ,经过消噪结构之后的数据维度仍然保持在 128×200 。FFT 和 Merge 位于消噪网络结构之后,在 FFT 结构中,输入的数据转变为复数信号,得到的数据维度为 128×100 。信号经过消噪处理之后与训练序列变换至频域进行计算,如式(3)所示。

$$H_{LS} = F(\hat{y}) \times F^{-1}(\bar{x}) \quad (3)$$

式中: H_{LS} 为 LS 信道经过噪声处理与频域变换后的估计值,LS 为信道名称; F 为快速傅里叶变换; \bar{x} 为本地训练序列。

DNLSTM 结构的主要组成部分是信号估计模块,因此,在进行信号传播时,为了更好地提取数据中的时间信息,在双向 LSTM 结构后面将所有神经元展开通过全链接前向反馈神经网络结构从而得到信道估计结果,即信道频率响应^[8],如式(4)所示。

$$\hat{H} = f(\theta_e; H_{LS}) \quad (4)$$

式中: \hat{H} 为信道估计模块的输出值; θ_e 为信道估计子网络的待训练值。

为更好地在 LSTM 层对数据进行训练,对信道估计网络的损失值进行计算,如式(5)所示。

$$L(\theta_e) = \sum_{i=1}^M \|f(H_{LS}(i), \theta_e) - H\|_2 \quad (5)$$

式中: L 为信道估计网络的损失值; i 为双向 LSTM 层,即在信道估计的子网络结构中,包含有 1 个双向 LSTM 层和 2 个全连接层; H 为信道估计网络输入值。

DNLSTM 是一个含有多个输入和单个输出的网络结构,该结构的输入为时域接收信号和训练序列,接收端的信号数据和训练序列均为复数信号,采样率为 100,输入均为 1 s 的信号数据,即 100 个采样点。针对 128×100 的数据,首先将长度为 100 的数据信号分成 5 段,每段设置 20 个采样点,然后对每一段进行 FFT 运算,将长度为 100 的数据信号转变为 5×32 ,经过 FFT 变换后的数据维度为 $128 \times 5 \times 64$ 。训练序列同该步骤同步进行数据维度转换操作,进行 FFT 运算后,训练序列对每个值取倒数运算,最后得到的 Merge 输出数据维度为 $128 \times 5 \times 32$,将两部分数据进行链接得到的最终数据为 $128 \times 5 \times 64$ 。

1.2 基于 WSINR 信道质量评估算法构建

在随钻无线通信过程中,由于工作环境变化较大,导致信道特性容易发生改变,接收端收到的随钻信号会出现不同程度的失真^[9-10]。因此,如何更好地利用信道特性的变化提高信号传输的质量和效率是亟需解决的问题。无线通信信道质量评估的常用指标包括信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)、信干噪比(Signal to Interference Plus Noise Ratio, SIPNR)、接收信号强度指标(Received Signal Strength Indicator, RSSI)以及链路质量指标(Link Quality Indicators, LQI)^[11-12]。但是,在随钻的信道质量评估中,由于钻井环境的变化多端,数据信号传输会受到较强的干扰和噪声,因此 RSSI 指标的评价作用受到限制。本研究在 DNLSTM 信道估计的基础上,构建一种 WSINR 的信道质量评估方法。在随钻测量脉冲系统中,一般采用泵冲干扰消除算法对这一干扰进行去除,即利用泵冲同步脉冲信号计算所得频率来实现泵冲消除,但受环境影响,去除精度会受到影响,因此,研究将傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)自适应泵冲干扰消除方法与归一化最小均方自适应(Normalized Minimum mean Square Adaptive, NMSA)滤波泵冲干扰算法相结合,利用两者之间的联系来消除泵冲干扰^[13]。钻井液信道会根据事件的变化而发

生改变,DFT 通过噪声消除可以调整泵冲干扰频点的抑制幅度,由此得到的泵冲信号频点经过抑制之后的结果如式(6)所示。

$$X_{dn} = X \cdot E \quad (6)$$

式中: X_{dn} 为 DFT 自适应噪声消除结果; X 为经过傅里叶变换的频域信号; E 为定义频域抑制向量。

因此,在钻井液脉冲通信系统中,信号的波动区间较大,利用归一法对上述问题进行解决,如式(7)所示。

$$\omega(k+1) = \omega(k) + \mu e(k) \frac{x(n)}{a + x(k)^T x(k)} \quad (7)$$

式中: $\omega(k+1)$ 为与 $\omega(k)$ 滤波器系数相邻的下一个滤波器系数; $x(n)$ 为输入信号; $\omega(k)$ 为 k 滤波器系数; μ 为收敛因子; $x(k)$ 为频点抑制系数; $e(k)$ 为误差; a 为常数,目的在于避免波动较小的信号出现收敛速度慢的缺陷。

若钻井液脉冲输入信号为 $x(n)$,利用泵冲信号计算得到的干扰周期为 T_0 , T_0 对钻井液脉冲信号 $x(n)$ 抽取后,得到的抽样函数如式(8)所示。

$$\delta_T(n) = \sum_{k=1}^M \delta(n + kT_0) \quad (8)$$

式中: $\delta_T(n)$ 为脉冲信号 $x(n)$ 的抽样函数; k 为频点数量; M 为偏移量为 n 时抽取 M 个点; T 为信号时宽; $\delta(n + kT_0)$ 为利用干扰周期 T_0 对脉冲信号进行抽取。

泵冲干扰消除后经过 NMSA 自适应滤波器系数表达式如式(9)所示。

$$\begin{cases} \omega = \omega + \mu X_{dn}(n) x_{\text{sample}}(n) \\ \mu = \frac{\beta}{MP + C} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω 为滤波系数; $x_{\text{sample}}(n)$ 为采样信号偏移量; μ 为更新的步长; M 为滤波器长度; C 为常数; P 为信号的有效功率; β 为更新系数。

DFT 用于处理纯噪声,NMSA 用于消除低频段的泵冲干扰。通过上述方法对泵冲干扰进行消除后,构建 WSINR 信道质量评估方法,如式(10)所示。

$$W_{\text{ch},k} = 10 \lg \left(\frac{P_s}{\lambda P_1 + P_N} \right) \quad (10)$$

式中: $W_{\text{ch},k}$ 为第 k 个信道的加权性干燥比值,dB,ch 为信道; P_N 为噪声信号的有效功率; P_s 为通信信号的有效功率; P_1 为干扰信号的有效功率; λ 为加权因子。

泵冲干扰消除算法的精度较高,则 λ 值较大,趋近于 1;若精度较低,则该值较小,趋近于 0。基于加权因子的信干噪比的信道质量评估方法利用 Chirp 信号和静默期采集的噪声信号进行运算,具体流程如图 2 所示。

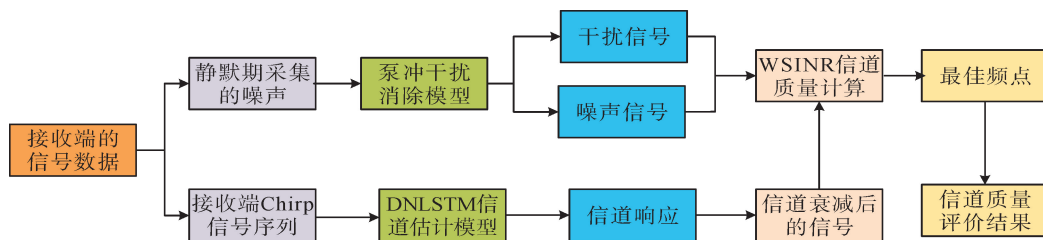


图 2 基于 WSINR 的信道质量评估流程

在运行过程中,系统根据所需的 Chirp 信号和收集的噪声信号来提取 Chirp 信号序列和噪声,然后利用研究构建的 DNLSTM 信道估计方法得到 Chirp 信号和输入的随钻通信信道信号的响应估计值,再对得到信号值进行泵冲干扰处理,则可以得到信道质量的评估指标。

2 基于链路自适应的随钻无线通信信道质量评估方法性能分析

2.1 基于深度学习的信道估计方法性能分析

为验证研究提出的 DNLSTM 信道估计方法的有效性,首先对该算法进行训练,Nvidia 2080Ti GPU 为试验环境,内存为 32 GB。训练使用的数据集来自某矿井项目中获取的数据信息,经过筛选后共计 10 000 条信号数据,其中 40%作为训练集,60%为验证集,所有信号数据的信噪比均在 0~30 dB 范围内。研究以常用的几种信道估计方法进行对比,包括 LS、MMSE、基于深度神经网络信道估计方法(DL-CE),训练后得到的不同信道估计方法的性能比较如图 3 所示。图 3(a)是在线性系统条件下,不同信道估计方法之间的差异,从图中可以看出,随着信噪比的不断增大,4 种信道估计方法的均方误差值均呈现下降的趋势。当信噪比低于 20 dB 时,其均方误差值下降得较快;当信噪比高于 20 dB 时,4 种方法的均方误差值均下降缓慢。整体来看,LS 信道估计方法的性能较弱,研究提出的 DNLSTM 信道估计方法有显著优势,该方法的平均均方误差为 0.005。图 3(b)是在非线性系统中的信道估计结果。由图可知,LS 方法受非线性系统影响显著,其均方误差值达到 1,非线性系统对 MMSE 和 DL-CE 方法也产生了相对较大的影响,而研究提出的 DNLSTM 方法的均方误差值为 0.001,即在非线性系统中该方法具有更加显著的优势,适用性更好。

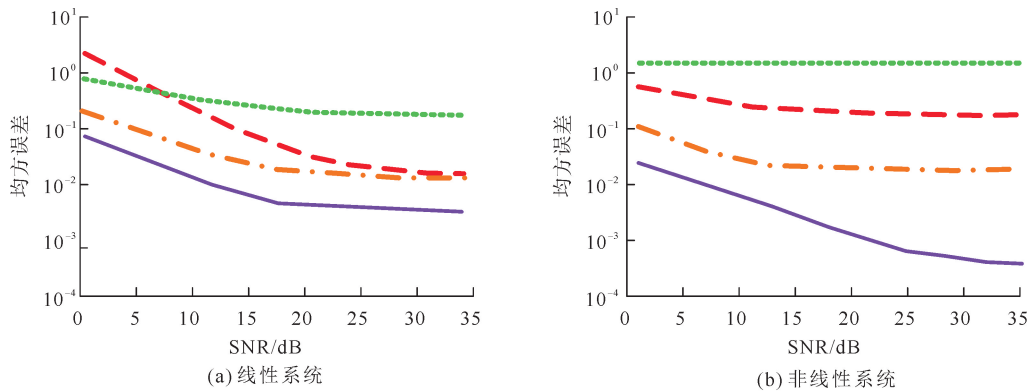


图 3 不同信道估计方法的性能比较

●●● LS; — DNLSTM; - - - MMSE; - · - DL-CE

在深度学习算法中,所用算法的鲁棒性对其实际应用效果有重要影响,对不同信道估计方法的鲁棒性进行比较,结果如图 4 所示。在图 4(a)中,没有经过训练的信噪比值处的信道估计结果与本研究提出的信道估计方法差异较小,两者的信道估计效果比较一致,而 LS 和 MMSE 方法均有较高的误差值,信道估计性能较差。该实验所使用噪声信号来自实际钻井环境。在图 4(b)中,受非线性系统影响,LS 和 MMSE 两信道估计方法基本无法实现信道估计,均方误差值始终保持在 1 左右,但是,研究提出的 DNLSTM 信

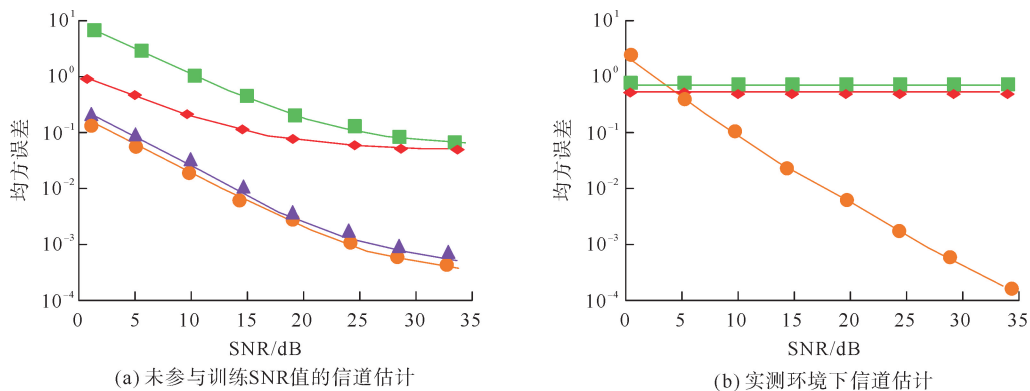


图 4 信道估计模型的鲁棒性比较

■ LS; ◆ MMSE; ▲ No trained; ● DNLSTM

道估计方法在信道估计上具有明显优势,随着信噪比的不断增加,其急剧降低,当信噪比为 35 dB 时,该方法的误差值下降至 0.0001。由此说明,研究提出的信道估计方法具有广泛的适用性,在环境恶劣的钻井施工现场,受到的干扰也较小,相比于传统的信道估计方法,这一方法有显著的优越性和适用性。

为更好地对提出的信道估计模型实际应用效果进行分析,利用某地的实井实验基地 2020 年 8 月和 2021 年 8 月的数据对该方法进行验证。具体的信道传输质量如表 1 所示。由表 1 可知,在不同的矿井深度和不同的码率条件下,平均误码率最大为 0.0042,

该误码率保持在 0.005 以下,其信道传输质量较好。在矿井深度为 3078 m 时,码率为 13 bit/s,该信道传输质量在国内外已有的实践研究中均处于前列水平^[14]。

2.2 基于 WSINR 信道质量评估算法性能分析

为验证提出的 WSINR 信道质量评估方法,对随钻测量泥浆连续波脉冲系统的特点进行分析,静默期收集的噪声是在钻井现场收集的噪声信号,该信号频段的总长度为 800 s,受试验条件的限制,研究仅截取其中的 50 s 信号长度进行试验分析,结果如图 5 所示。分析本地 Chirp 序列经过信道估计模型估计之后得到的信号功率估计结果可以发现,随着频率的增加,功率谱整体呈下降趋势,信号的功率谱在 30 Hz 之后出现更加明显的衰减。静默期采集的噪声是实际钻井噪声的功率谱估计结果,可以发现,在频率为 10、13、30、38、52 以及 65 Hz 时出现明显的干扰分量。分析采用基于 DFT 的自适应泵冲干扰消除算法处理后得到信号噪声和干扰信号功率谱,可以发现,通过干扰消除算法对噪声进行处理之后,功率谱的变化幅度减小,泵冲干扰对信号波段的影响得到有效改善。基于 WSINR 评价方法的通信信道的最佳频点出现在 25 和 30 dB 附近,此即 WSINR 信道质量评估的最优频点。对于一些信道质量较差的频点,在实际钻井工作中应当避免。

脉冲非线性条件和不同的载波频点也会对随钻无线通信信道质量产生影响。因此,从这两个方面对 WSINR 信道质量评估方法的可行性进行验证,结果如图 6 所示。图 6(a)为理论上的正选脉冲信号和实际非线性环境下脉冲信号比较,可以看出实际的脉冲信号之间的距离更窄。从图 6(b)可以看出,信道质量评估结果的误码率略低于理论误码率,随着信噪比的增加,理论误码率和实际误码率之间的差距逐渐增大,当信噪比为 15 dB 时,经过计算,实际误码率约为 3.16×10^{-5} ,理论误码率约为 3.2×10^{-4} ,整体误码率在合理范围内,即研究提出方法具有可行性。

表 1 信道传输质量

码率/ (bit · s ⁻¹)	矿井深度/m	平均误码率	平均输出信 噪比/dB
6	865.26	0	23.6749
8	865.26	0	21.4982
10	865.26	0	22.0637
10	1987.59	0	19.4582
9	2039.64	0	18.8761
11	1954.00	0.0019	15.9026
12	2068.00	0	16.4988
12	2849.00	0.0042	14.3475
13	2966.00	0	18.1537
13	3078.00	0.0034	15.6610

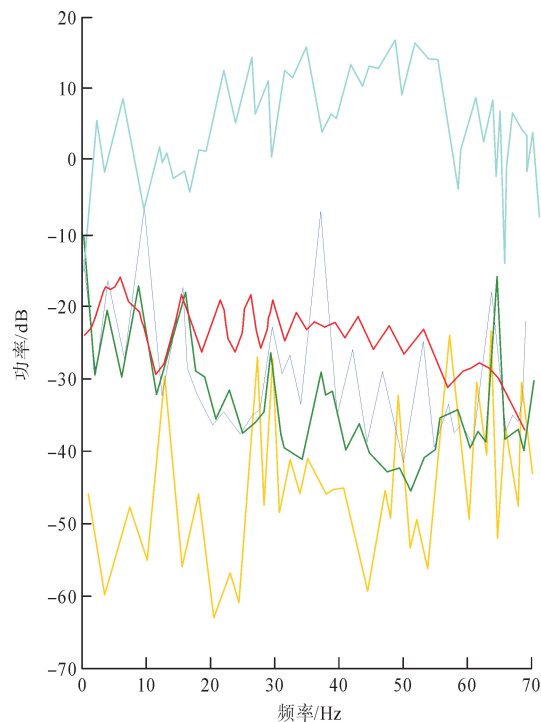


图 5 基于 WSINR 评价方法的不同信号分析

— Chirp 信道估计; — 静默期采集的噪声; — 噪声信号;
— 干扰信号; — WSINR

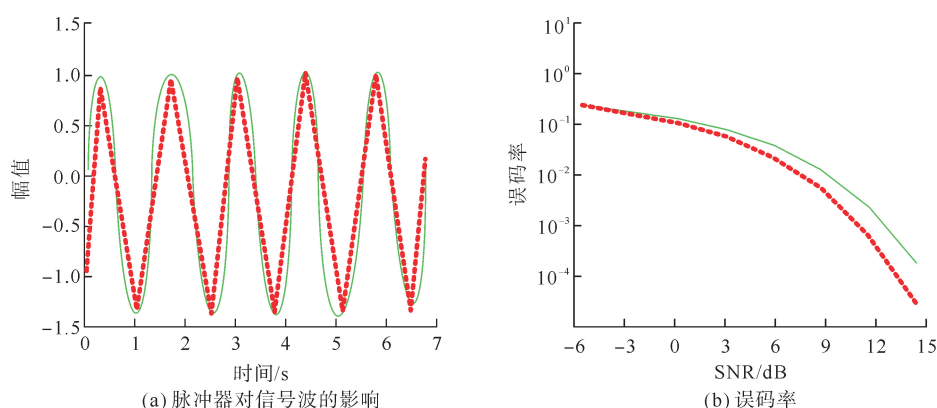


图 6 非线性条件对信道质量评价的影响

—理论值; ····实际值

3 结论

随着石油开采难度的不断增大,随钻测量技术必将成为石油开采过程中的必要技术之一。针对实际钻井过程中复杂多变的环境对无线通信信道质量的影响问题,首先提出基于深度学习的通信信道估计方法,在此基础上,研究构建了基于 WSINR 的随钻无线通信信道质量评估方法。实验结果显示,LS 方法受非线性系统影响显著,其均方误差值达到 1,再者是 MMSE 和 DL-CE 方法,而提出的 DNLSTM 方法的均方误差值为 0.001,在非线性系统中该方法具有更加显著的优势。当信噪比为 35 dB 时,该方法的误差值下降至 0.0001。在非线性条件的影响下,信道质量评估结果的误码率略低于理论误码率,随着信噪比的增加,理论误码率和实际误码率之间的差距逐渐增大,当信噪比为 15 dB 时,实际误码率约为 3.16×10^{-5} ,理论误码率约为 3.2×10^{-4} ,整体误码率在合理范围内。综上所述,研究提出基于链路自适应的随钻无线通信信道质量评估方法具有较高的准确性和更加广泛的适用性,可将其应用于石油开采工作。但是研究在对提出的信道估计方法进行验证时所使用的数据有限,在后续研究中需要收集更多数据进行测试和改进来保证算法的性能。

参考文献(References):

- [1] 杨一,程为彬,汪跃龙,等. 随钻弱 SNR 信号的 Duffing 振子混沌检测与恢复[J]. 仪器仪表学报,2020,41(2):235-244.
YANG Yi, CHENG Weibin, WANG Yuelong, et al. Chaos detection and parameters recovery of Duffing oscillator for weak SNR signal while drilling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 235-244.
- [2] 蒲文学,范光第,朱建建,等. 磁性随钻测斜仪所需无磁钻具长度及影响因素研究[J]. 石油钻探技术,2022,50(4):129-134.
PU Wenxue, FAN Guangdi, ZHU Jianjian, et al. Research on the length of non-magnetic drilling tools for magnetic inclinometer while drilling and its influence factors[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 129-134.
- [3] 王小波. 无线电波随钻测量系统姿态精度的影响因素分析[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(6):258-264.
WANG Xiaobo. Factors affecting the attitude accuracy of wireless electromagnetic wave MWD system[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 258-264.
- [4] 韩冬,孙伟,陈龙,等. 随钻姿态测量重力加速度自适应提取算法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(2):17-25.
HAN Dong, SUN Wei, CHEN Long, et al. An adaptive extraction algorithm of gravity acceleration in MWD[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 17-25.
- [5] 孙鑫,张少华,程敬义,等. 基于 MLR-RBF 的岩石强度智能随钻识别实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2022,39(5):981-991.
SUN Xin, ZHANG Shaohua, CHENG Jingyi, et al. Experimental study on intelligent identification of rock strength while drilling based on MLR-RBF[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(5): 981-991.
- [6] 金鑫,肖勇,曾勇刚,等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿[J]. 中国电机工程学报,2020,40(9):2800-2809.
JIN Xin, XIAO Yong, ZENG Yonggang, et al. Modeling and error compensation for low-voltage broadband power line communications[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2800-2809.
- [7] 真齐辉,底青云,王煜亮,等. 智能导井下随钻单芯总线信道特征及接口驱动[J]. 地球物理学报,2023,66(1):131-138.
ZHEN Qihui, DI Qingyun, WANG Yuliang, et al. Channel characteristics and interface drive of single core bus of while drilling in intel-

- ligent guide drilling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1): 131-138.
- [8] 赵傲耸, 陈浩, 张波, 等. 周期性管柱信道的声波通信技术研究综述[J]. 应用声学, 2020, 39(5): 791-798.
ZHAO Aosong, CHEN Hao, ZHANG Bo, et al. Review on downhole acoustic communication technology based on periodic string channel[J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(5): 791-798.
- [9] 吴灏, 康颖, 葛松虎, 等. VHF/UHF 通信电台接收链路中的干扰抑制合并方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 1014-1021.
WU Hao, KANG Ying, GE Songhu, et al. Interference rejection combining method in receive chain of VHF/UHF communication radio[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(3): 1014-1021.
- [10] 曹连江, 赵世华. 可变基频激光通信链路传输信道建模研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(1): 168-172.
CAO Lianjiang, ZHAO Shihua. Research on modeling of transmission channel of variable fundamental frequency laser communication link[J]. Laser Journal, 2020, 41(1): 168-172.
- [11] 陈俊霖, 齐继东, 鲜娟, 等. 基于聚类挖掘的移动通信网络链路优化设计[J]. 计算机仿真, 2022, 39(3): 184-187.
CHEN Junlin, QI Jidong, XIAN Juan, et al. Optimization design of mobile communication network link based on clustering mining[J]. Computer Simulation, 2022, 39(3): 184-187.
- [12] 谢文平, 尹禄高, 陈小敏, 等. 塔架环境通信网络信道模型及性能研究[J]. 信号处理, 2021, 37(11): 2077-2083.
XIE Wenping, YIN Lugao, CHEN Xiaomin, et al. Channel model and performance evaluation for communication networks inside tower scenarios[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(11): 2077-2083.
- [13] 曹连江, 赵世华. 可变基频激光通信链路传输信道建模研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(1): 168-172.
CAO Lianjiang, ZHAO Shihua. Research on modeling of transmission channel of variable fundamental frequency laser communication link[J]. Laser Journal, 2020, 41(1): 168-172.
- [14] 闫宏亮, 耿焱, 翟伟志. 连续波钻井液脉冲器电流解耦控制器的研究[J]. 石油机械, 2022, 50(10): 37-43.
YAN Hongliang, GENG Yan, ZHAI Weizhi. Research on current decoupling controller of continuous wave mud pulser[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(10): 37-43.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)

(上接第 122 页)

- [12] 冯怡然, 雷晓静, 陶学恒, 等. 消防水带智能化干燥收卷设备的研发[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(10): 1494-1497.
FENG Yiran, LEI Xiaojing, TAO Xueheng, et al. Research and development of intelligent drying and rewinding equipment for fire hoses[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(10): 1494-1497.
- [13] 顾勇. 双排座柴油动力多功能车(UTV1100)在森林消防中的应用[J]. 林业机械与木工设备, 2018, 46(9): 53-55.
GU Yong. Application of double-row diesel-powered utility vehicle (UTV1100) in forest firefighting[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2018, 46(9): 53-55.
- [14] 胡博, 邹建中. 利用 Arduino 和 LabVIEW 探究电磁感应定律[J]. 物理通报, 2021(4): 56-59.
HU Bo, ZOU Jianzhong. Exploring the laws of electromagnetic induction with Arduino and LabVIEW[J]. Physics Bulletin, 2021(4): 56-59.
- [15] 陈杰. 浅析消防装备智能化自动控制技术[J]. 中国设备工程, 2023(16): 38-40.
CHEN Jie. Analysis of intelligent automatic control technology for fire-fighting equipment[J]. China Plant Engineering, 2023(16): 38-40.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)