Mine Engineering 矿山工程, 2025, 13(6), 1447-1454
Published Online November 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2025.136160

井漏失返MWD无信号原因分析

侯伟煌，王永康，申　浩，闫梦焓

重庆科技大学石油与天然气工程学院，重庆

收稿日期：2025年10月13日；录用日期：2025年11月11日；发布日期：2025年11月20日

摘　要

在复杂地质条件下的油气勘探开发过程中，低压地层的钻探作业常面临严峻挑战，其中井漏和随钻测量(MWD)信号丢失是两大关键难题。当钻遇低压易漏地层时，钻井液大量漏失导致井筒内液柱压力下降，严重时发生“失返”现象，即循环系统无法建立有效循环，钻井液无法从井口返出。在此工况下，泥浆脉冲MWD系统往往出现信号传输中断或完全无信号，严重影响实时地质导向与工程决策。本文以实际钻井案例为基础，结合流体力学、信号传输理论及现场实践经验，系统分析了低压钻井发生井漏失返后MWD无信号的根本原因。研究指出，主要影响因素包括：井筒内有效循环通道丧失导致泥浆脉冲无法传播；环空液面大幅下降致使信号衰减加剧；钻具结构与井眼几何形态变化对声波/压力波传播路径的干扰；以及地面传感器因流体流量不足而无法捕捉微弱信号等。通过建立简化物理模型与数值模拟，验证了上述机理。最后，提出了针对性的应对策略，包括优化钻具组合设计、采用电磁MWD或正脉冲系统、强化堵漏技术、实施间歇式信号发送模式等。本研究成果对于提高复杂地层钻井安全性、保障随钻数据连续性具有重要指导意义。

关键词

低压钻井，井漏，失返，MWD，信号丢失，泥浆脉冲，随钻测量

Analysis of the Causes of MWD Signal Loss Due to Well Leakage and Return Flow

Weihuang Hou, Yongkang Wang, Hao Shen, Menghan Yan

College of Petroleum and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 13, 2025; accepted: November 11, 2025; published: November 20, 2025

Abstract

In the process of oil and gas exploration and development under complex geological conditions, drilling operations in low-pressure formations often encounter severe challenges, with well leakage and

文章引用: 侯伟煌, 王永康, 申浩, 闫梦焓. 井漏失返 MWD 无信号原因分析[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1447-1454.
DOI: 10.12677/me.2025.136160

the loss of measurement-while-drilling (MWD) signals being two key problems. When encountering low-pressure and easily leaking formations, a large amount of drilling fluid leaks, causing a drop in the liquid column pressure in the wellbore. In severe cases, the "loss of return" phenomenon occurs, meaning that the circulation system cannot establish an effective circulation and the drilling fluid cannot return to the surface. Under such conditions, the mud pulse MWD system often experiences signal transmission interruption or complete loss of signal, seriously affecting real-time geological steering and engineering decision-making. Based on actual drilling cases, combined with fluid mechanics, signal transmission theory, and field practical experience, this paper systematically analyzes the fundamental reasons for the loss of MWD signals after well leakage and loss of return in low-pressure drilling. The research points out that the main influencing factors include: the loss of effective circulation channels in the wellbore, which prevents the propagation of mud pulses; the significant drop in the annular liquid level, which intensifies signal attenuation; the interference of the drill string structure and wellbore geometry changes on the propagation path of acoustic and pressure waves; and the inability of surface sensors to capture weak signals due to insufficient fluid flow. Through the establishment of a simplified physical model and numerical simulation, the above mechanisms were verified. Finally, targeted countermeasures were proposed, including optimizing the drill string assembly design, adopting electromagnetic MWD or positive pulse systems, strengthening well control technology, and implementing intermittent signal transmission modes. The research results have significant guiding significance for improving the safety of drilling in complex formations and ensuring the continuity of MWD data.

Keywords

Low-Pressure Drilling, Well Leakage, Lost Circulation, MWD, Signal Loss, Mud Pulse, Measurement While Drilling

1. 引言

随着全球油气资源勘探开发向深水、深层及非常规领域拓展，钻井作业面临的地层压力环境日益复杂[1] [2]。尤其是在碳酸盐岩裂缝性储层、页岩气储层及老油田开发调整井中，普遍存在异常低压地层。这类地层通常具有低破裂压力梯度、高孔隙压力敏感性和天然裂缝发育等特点，极易在钻进过程中发生钻井液漏失，严重时导致循环失返[3] [4]。与此同时，现代钻井高度依赖随钻测量(Measurement While Drilling, MWD)和随钻测井(Logging While Drilling, LWD)技术实现地质导向、轨迹控制和工程参数监测。MWD系统作为核心工具，其信号稳定性直接关系到钻井效率与安全。

目前主流的 MWD 信号传输方式为泥浆脉冲遥测技术，其原理是通过井下脉冲发生器周期性改变钻柱内钻井液流动截面，产生压力波动(压力脉冲)，该脉冲沿钻井液介质以声波形式向上传播至地面立管，由安装在立管上的压力传感器接收并解码[3]。然而，在低压地层发生严重井漏甚至失返的情况下，该信号传输机制常常失效，表现为地面系统长时间收不到任何有效信号或信号信噪比极低，无法解码。这一现象不仅造成实时数据中断，还可能误导司钻判断井下状况，延误事故处理时机。

尽管现场技术人员普遍认识到“漏失导致 MWD 无信号”的经验规律，但对其内在机理缺乏系统性分析与理论支撑。现有文献多集中于 MWD 信号衰减模型、噪声抑制算法[5]或新型传输技术(如电磁波、声波)的探讨[6]，而针对“漏失–失返-MWD 失效”这一特定工况的成因分析较为匮乏。因此，深入研究低压钻井井漏失返后 MWD 无信号的物理机制，不仅具有重要的理论价值，更能为现场提供科学的应对方案。

本文旨在填补这一研究空白，通过梳理典型现场案例，构建理论分析框架，揭示井漏失返条件下MWD信号中断的关键因素，并提出可行的技术对策，为复杂地层高效安全钻井提供技术支持。

2. 现场案例背景

某区块位于中国西部前陆盆地，目标层位为奥陶系碳酸盐岩储层，埋深约 6000 米。该地层经历多期构造运动，裂缝－溶洞极为发育，地层压力系数低至 0.85~0.95 g/cm^3，属典型低压易漏地层。在 A-1H 水平井钻探过程中，当钻头进入目的层约 200 米时，发生严重井漏，漏速高达 40 m^3/h，随后发展为完全失返状态——即泵入的钻井液全部漏入地层，井口无任何液体返出。

在此期间，MWD 系统(采用负脉冲泥浆脉冲器)信号迅速减弱，约 15 分钟后完全中断。地面监控系统持续显示“无信号”状态，即便调整脉冲器工作模式(如增强信号强度、降低传输速率)，仍无法恢复通信。司钻被迫停止钻进，进行堵漏作业。经过近 30 小时的桥浆堵漏和承压堵漏，成功封堵漏失通道，恢复部分循环后，MWD 信号随即恢复。

值得注意的是，在后续钻进中，每当接近已知漏层或出现轻微漏失时，MWD 信号均出现明显延迟或中断现象，证实了井漏与 MWD 信号丢失之间的强相关性。该案例凸显了在低压易漏地层中保障 MWD 信号连续性的紧迫性。

3. MWD 信号传输基本原理

MWD 系统主要依赖三种信号传输方式：泥浆脉冲、电磁波和声波。其中，泥浆脉冲技术应用最广，尤其适用于大斜度井和水平井[1] [6]。

3.1. 泥浆脉冲传输机制

泥浆脉冲 MWD 通过井下脉冲发生器(通常为转阀式或旁通阀式)在钻柱内部周期性地制造局部节流，从而在钻井液中产生压力波动[7]。这些压力波以近似声速(约 1200~1500 m/s，取决于流体性质)沿钻柱内和环空中的钻井液介质向上传播[5] [8] [9]。地面压力传感器(通常安装在立管上)检测到这些微小的压力变化(幅度通常为 5~50 psi)，经滤波、放大和数字信号处理后解码为工程与地质数据[7]。

信号传播路径主要有两条：① 内流道路径：压力波沿钻杆内部向上传播。② 环空路径：部分能量通过钻头喷嘴进入环空，沿环空向上。

由于内流道路径阻抗较低，信号衰减较小，是主要传输通道。

3.2. 信号衰减因素

理想情况下，压力脉冲应能完整传至地面。但在实际钻井中，信号会因多种因素衰减：

① 粘滞耗散：钻井液粘度导致能量损失。

② 摩擦阻力：管壁摩擦消耗波能。

③ 分支干扰：钻具接头、稳定器等造成反射与散射。

④ 噪声干扰：泥浆泵、振动筛等设备产生背景噪声。

⑤ 气体侵入：气液两相流显著降低声速并增加衰减。

在正常循环条件下，现代 MWD 系统可通过编码优化和信号增强技术克服大部分衰减[9]。然而，当发生严重井漏导致失返时，上述机制被严重破坏，信号传输面临根本性挑战。

4. 井漏失返对 MWD 信号的影响机理

当钻井液大量漏失并发展为失返时，井筒内的流体动力学环境发生剧变，直接影响 MWD 压力脉冲

的生成、传播与接收。以下从四个层面系统分析其作用机理。

4.1. 循环通道破坏与信号路径中断

在完全失返状态下，泵入的钻井液全部漏入地层，井筒内无法形成连续的液柱回路[2]。此时，钻杆内部虽有流体流动(由泥浆泵驱动)，但环空中液面可能降至极低水平，甚至在漏失点以下形成“干段”。

这种非完整循环体系导致：

① 环空信号路径断裂：传统认为环空也参与信号传播，尤其在复杂井眼中。一旦环空液面过低，该路径即被切断。

② 内流道压力波反射增强：在液－气界面或液－固界面(如裸眼井壁)，压力波会发生强烈反射。若钻杆内液柱不连续或存在气穴，脉冲信号在传播途中被多次反射、折射，能量迅速耗散。

③ 信号源下游阻抗突变：脉冲发生器产生的压力扰动需通过稳定介质传播。失返导致井底压力骤降，钻头处压力边界条件不稳定，影响脉冲生成质量。

4.2. 液柱高度下降与静液柱压力降低

根据流体静力学原理[10]，井底压力 $P_b = P_{hyd} + P_{surf}$，其中 $P_{hyd} = \rho gh$ 为静液柱压力。失返时，环空液面 h 大幅下降，P_{hyd} 显著降低，可能导致井底欠平衡，进一步加剧漏失。

更重要的是，液柱高度直接影响压力波的传播特性：

① 声速降低：钻井液中混入气体或液柱缩短会导致整体声速下降，信号传播速度变慢且不稳定。

② 衰减系数增大：实验表明，气液两相流的声波衰减系数远高于单相液体。即使少量气体侵入，也会使信号强度呈指数级衰减[6]。

③ 驻波效应：在短液柱系统中，压力波易在上下边界间形成驻波，干扰原始信号频率，造成解码失败。

4.3. 钻具与井眼几何变化对波传播的影响

在失返工况下，钻具可能处于“坐卡”或“轻载”状态，钻具弯曲、偏心程度增加。同时，由于缺乏环空流体润滑，钻具与井壁接触应力增大，局部摩擦加剧。

这些机械变化对压力波传播的影响包括：

① 管壁阻尼增加：钻具振动受阻，导致压力波能量更多地被管壁吸收而非有效传递。

② 传播路径畸变：钻具弯曲改变了压力波的轴向传播路径，引入额外散射损失。

③ 共振频率偏移：钻柱系统的固有频率因边界条件变化而改变，可能使 MWD 信号频率落入共振抑制区。

此外，若漏失发生在大斜度段或水平段，井眼轨迹本身就会引起信号多重反射与干涉，失返进一步恶化此效应。

4.4. 地面接收系统灵敏度下降

即使微弱信号勉强传至地面，其可检测性仍受接收系统限制。在失返状态下：

① 立管流量趋近于零：泥浆泵虽在运行，但输出流体全部漏失，立管中几乎无流动。地面压力传感器依赖流体流动带来的动态压力变化来捕捉信号。当流速过低时，传感器信噪比急剧下降。

② 背景噪声相对增强：在低流量工况下，泥浆泵本身的脉动、设备振动等噪声成分占比上升，淹没微弱的 MWD 信号。

③ 传感器响应滞后：部分压力传感器在低频或静态压力下响应迟钝，难以捕捉快速变化的脉冲信号。

综上所述，井漏失返通过破坏循环完整性、降低液柱高度、改变钻具状态和削弱地面接收能力等多重途径，共同导致 MWD 信号无法有效传输与识别。

5. MWD 信号传输理论模型与数值模拟

为量化上述影响，本文构建了一简化的 MWD 信号传播一维模型。

5.1. 理论模型与数值模拟

将钻柱内流体视为可压缩流体，满足一维非定常流方程。忽略温度变化，假设流体密度 ρ 和体积模量 K 恒定。脉冲发生器简化为在位置 $x = L_p$ 处施加的周期性压力扰动 $\Delta P(t)$。地面传感器位于 $x = 0$，接收压力信号 $P(0,t)$。井底在失返时设为开放边界(压力恒定或自由流出)。

控制方程[9]为：

$$\frac{\partial P}{\partial t} + c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

式中，$c = \sqrt{K/\rho}$ 为声速，v 为流速。

模型参数设置：井深：3000 m；钻井液密度 ρ_0：1200 kg/m^3；体积模量 K：1.8 GPa→声速 ≈ 1400 m/sc ≈ 1400 m/s；脉冲频率：2 Hz (典型 MWD 工作频率)；脉冲幅值：初始扰动 ΔP = 20 psi ≈ 138 kPaΔP = 20 psi ≈ 138 kPa；脉冲发生器位置：距井底 10 m (x = 2990 m)；地面传感器位置：$x = 0$。

边界条件：上端(地面)：压力恒定 $P = P_{atm}$，或设定为自由流出；下端(井底)：正常工况：封闭边界(无流动)；失返工况：开放边界(自由流出，压力恒定)。

初始条件：全井段静止，压力分布为静水压力梯度。数值求解采用有限差分法(Lax-Wendroff 格式)，时间步长 Δt = 10^{-4} s， Δt = 10^{-4} s，空间步长 Δx = 1 m。

5.2. 模拟结果

图 1 正常与失返工况下地面接收到的压力信号波形对比。横轴为周期，纵轴为幅度。可见失返工况下信号幅值显著降低，波形上升沿变缓，出现明显畸变。

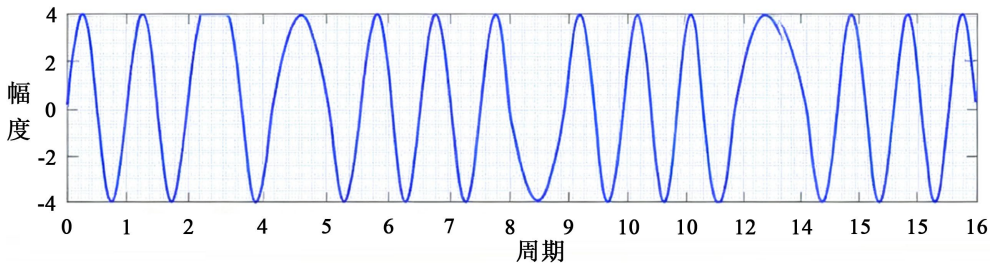
图 2 不同工况下压力脉冲幅值随传播距离(井深)的变化。横轴为距脉冲源的周期，纵轴为相对幅值。随着井深增加幅度降低，而失返工况衰减速度远快于正常工况，在 2225 m 处已衰减至不足 50%。

结果分析：模拟结果显示，在失返工况下：

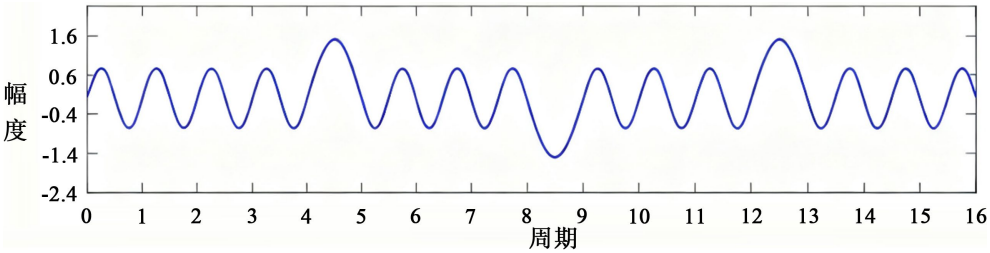
① 地面接收到的信号幅值衰减超过 90%，远高于正常工况的约 30%；

② 波形畸变严重，上升时间增加，不利于数字解码；

③ 该结果验证了理论分析的正确性：失返导致的介质变化显著削弱了信号强度与保真度。

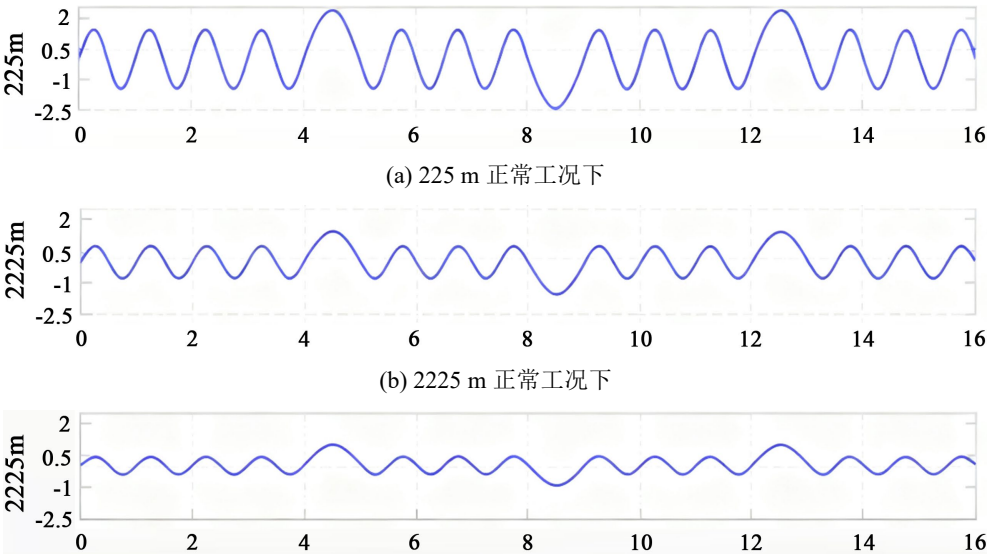


(a) 正常工况



(b) 失返工况

Figure 1. Comparison of ground pressure signal waveforms under normal and non-return conditions
图 1. 正常与失返工况下地面压力信号波形对比



(a) 225 m 正常工况下

(b) 2225 m 正常工况下

(c) 2225 m 失返工况下

Figure 2. Signal amplitude attenuation curve along well depth
图 2. 信号幅值沿井深的衰减曲线

6. 应对策略与技术建议

针对低压钻井井漏失返导致 MWD 无信号的问题，需采取综合措施，从预防、监测到应急处置全方位应对。

6.1. 优化钻具组合与 MWD 配置

选用正脉冲系统：正脉冲通过短暂关闭钻杆内通道产生正压脉冲，对下游流动状态依赖较小，在低循环效率下表现更稳定[11]。

缩短 MWD 短节位置：将 MWD 仪器尽量靠近钻头，减少信号传播距离，降低衰减。

避免使用大外径稳定器：减少环空堵塞风险，保持环空流通性。

6.2. 采用替代信号传输技术

电磁 MWD (EM-MWD)：利用地层作为导电介质，通过低频电磁波传输数据，不受钻井液循环影响，特别适用于失返或空气钻井。但受限于地层电阻率和传输距离[12]。

声波 MWD：通过钻具本体传播声波信号，不依赖流体介质，但易受钻具振动干扰，技术尚不成熟[13]。

存储式测井 + 短传技术：在预计漏失井段采用记忆式测井，钻至安全井段后再短传数据。

6.3. 强化漏失预防与即时处理

精细压力预测：利用地震、邻井资料精确预测地层压力与破裂压力，设计合理钻井液密度窗口。

分级堵漏预案：准备不同粒径的堵漏材料(如云母、坚果壳、纤维)，实施“随钻堵漏”或“桥浆堵漏”。

控压钻井(MPD)：采用主动式控压系统，维持井底压力略高于孔隙压力但低于破裂压力，减少漏失风险。

6.4. 信号管理与操作优化

间歇式信号发送：在失返期间暂停常规数据传输，仅在必要时发送关键指令(如停泵、起钻)，减少无效能耗。

增强地面滤波算法：采用自适应滤波、小波去噪等技术提升低信噪比条件下的信号提取能力。

多传感器融合：结合立管压力、泵冲、扭矩等参数间接判断井下工具状态。

7. 结论

本文系统分析了低压钻井发生井漏失返后 MWD 无信号的根本原因，得出以下结论。

核心机理在于循环体系破坏：失返导致井筒内无法形成有效液柱回路，泥浆脉冲的传播路径被切断或严重劣化，是信号中断的直接原因。

多重因素协同作用：液柱高度下降引起声速降低与衰减加剧；钻具与井眼几何变化导致波传播路径畸变；地面接收系统因流量不足而灵敏度下降，共同构成 MWD 信号失效的复合机制。

理论模型得到验证：通过简化流体动力学模型模拟，证实失返工况下 MWD 信号幅值衰减超过 90%，波形严重畸变，难以被地面系统识别。

提出综合应对策略：建议优先采用电磁 MWD 或正脉冲系统，优化钻具设计，强化堵漏技术，并结合智能信号管理手段，以保障极端工况下的数据连续性。

未来研究可进一步开展全尺寸物理模拟实验，量化不同漏失程度对 MWD 信号的影响阈值，并探索人工智能在信号恢复与故障诊断中的应用，推动复杂地层智能钻井技术的发展。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2420128-井漏段 MWD 信号传输通道优化)。

参考文献

[1] 苏义脑. 井下控制工程学导论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.

[2] Chen, W., Wang, C., Li, J., Li, J., Liu, G. and Zheng, S. (2025) Research on Optimization of Drilling Fluid Continuous Wave Signal for Measurement-while-Drilling in Deepwater Extended Reach Wells. *Ocean Engineering*, **340**, Article ID: 122342. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122342

[3] 蔡文军. 机械式无线随钻测斜仪系统研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2006.

[4] Luo, Y.R., Chen, M., Liu, D.S., Jin, Y., Du, M.H. and Hou, J. (2012) Technology and Applications of Foam Drilling Fluid in Fractured and Complex Formations. *Petroleum Science and Technology*, **30**, 1747-1754. https://doi.org/10.1080/10916466.2011.606254

[5] 李军, 马哲, 杨锦舟, 韩建来. 一种新型的 MWD 无线随钻测量系统[J]. 石油仪器, 2006(2): 30-32.

[6] Das, A., Al Saidi, H., Al Sawafi, S. and Taher, A. (2024) Evolutionary Advancement in Logging-while-Drilling Telemetry: Enhancing Real-Time Data for Agile Decision-Making and Cost Efficiency. *Mediterranean Offshore Conference*, Alexandria, October 2024, SPE-223365-MS. https://doi.org/10.2118/223365-ms

[7] Fauzan, G.B., Nasution, M.M. and Wahyuningrum, C. (2024) Pengambilan Data Inklinasi Dan Azimuth Dalam Proses Measurement While Drilling (MWD) Menggunakan Metode Mud-Pulse Telemetry Pada Sumur X Lapangan Y. *Jurnal Bhara Petro Energi*, **3**, 1-4. https://doi.org/10.31599/dhbkn414

[8] 李闪. 随钻泥浆脉冲信号检测与处理关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2011: 1-3.

[9] Li, H., Li, G., Meng, Y., Shu, G., Zhu, K. and Xu, X. (2012) Attenuation Law of MWD Pulses in Aerated Drilling. *Petroleum Exploration and Development*, **39**, 250-255. https://doi.org/10.1016/s1876-3804(12)60039-1

[10] 胡畔, 肖河川, 李伟成. 基于环空液面监测系统的自动在线监测研究[J]. 钻采工艺, 2016, 39(6): 66-68.

[11] Shao, J., Yan, Z., Han, S., Li, H., Gao, T., Hu, X., *et al*. (2017) Differential Signal Extraction for Continuous Wave Mud Pulse Telemetry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **148**, 127-130. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.09.047

[12] Musa, M.Z., Bt Abdul Aziz, D.S., Budi Setiawan, T., Hermawan, H., Kardani, I., Askar Ali, M.A., *et al*. (2012) Electro-magnetic Measurements while Drilling: A Telemetry Solution for Casing-while-Drilling. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Perth, October 2012, SPE-158245-MS. https://doi.org/10.2118/158245-ms

[13] Shah, V., Gardner, W., Johnson, D.H. and Sinanovic, S. (2004) Design Considerations for a New High Data Rate LWD Acoustic Telemetry System. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Perth, October 2004, SPE-88636-MS. https://doi.org/10.2118/88636-ms