

## 随钻电磁中继转发双向传输技术研究

李世银<sup>1</sup>, 张博文<sup>1</sup>, 张冠杰<sup>1</sup>, 张志<sup>1</sup>, 祁华艳<sup>1</sup>, 王勃<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 深地科学与工程云龙湖实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 针对国内随钻系统受限于单向传输、可靠性差和传输速率低等问题, 提出了一种基于中继转发的随钻电磁双向传输方案。通过对随钻传输信号进行实测, 分析了随钻杆无线传输的信道特性。设计了一种基于中继转发的双向通信协议, 实现了随钻信号传输距离与稳定性的有效提升。搭建了由现场可编程门阵列、放大电路、模数转换器、数模转换器和天线等模块组成的随钻样机, 并对其进行了性能测试。实测结果表明, 所设计方案实现了电磁波信号的中继接力双向可靠传输, 单跳传输距离达30 m, 中继传输距离100 m以上; 同时该方案传输速率在kbit/s级别, 比传统单向随钻系统提高了一个数量级。

**关键词:** 随钻电磁测量; 中继转发; 双向传输; 随钻样机

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2024182

## Research on electromagnetic relay forwarding bidirectional transmission technology while drilling

LI Shiyin<sup>1</sup>, ZHANG Bowen<sup>1</sup>, ZHANG Guanjie<sup>1</sup>, ZHANG Zhi<sup>1</sup>, QI Huayan<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>

1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2. Yunlong Lake Laboratory of Deep Underground Science and Engineering, Xuzhou 221116, China

**Abstract:** To solve the issues of unidirectional transmission, poor reliability, and low transmission rate in domestic drilling systems, a relay-based bidirectional electromagnetic transmission solution while drilling was proposed. Through field measurements of drilling transmission signals, the channel characteristics of wireless transmission through drill rods were depicted. A relay-based bidirectional communication protocol was designed, effectively enhancing the transmission distance and stability of drilling signals. A drilling prototype, composed of field programmable gate array (FPGA), amplification circuit, analog-to-digital converter (ADC), digital-to-analog converter (DAC), and antenna, was constructed and tested. Field test results demonstrate that the proposed scheme achieves reliable relay-assisted bidirectional transmission of electromagnetic signals, with a single-hop transmission distance of 30 m and relay transmission distance exceeding 100 m. Concurrently, the transmission rate of this scheme is at the kbit/s level, an order of magnitude improvement over traditional unidirectional drilling systems.

**Keywords:** electromagnetic measurement while drilling, relay forwarding, bidirectional transmission, drilling prototype

### 0 引言

资源勘探一直是科学与工程领域的重要课题之一。为了更高效地利用地下结构、矿产资源、油气

储层等资源, 随钻测量技术应运而生<sup>[1-2]</sup>。随钻测量技术是一种先进的实时监测手段, 其通过在钻井工具中集成传感器和测量设备, 便于钻探过程中实

收稿日期: 2024-05-09; 修回日期: 2024-09-20

通信作者: 张冠杰, zgj297@outlook.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62371451); 深地科学与工程云龙湖实验室基金资助项目(No.109023005)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.62371451), Yunlong Lake Laboratory of Deep Underground Science and Engineering Project (No.109023005)

时获取地下结构、地质参数及资源分布等信息。

随钻测量按信号传输方式可分为有线随钻测量和无线随钻测量<sup>[3-4]</sup>。有线随钻测量主要分为电缆和光纤传输,这2种方式虽然数据传输速率相对较高,但是布线复杂,成本较高,且很容易受到钻机碰撞导致的机械损伤<sup>[5]</sup>。无线随钻测量主要包括泥浆脉冲、声波和电磁波3种传输方式。泥浆脉冲传输方式是利用钻井泥浆作为传输介质,通过调整泥浆压力的变化来传递二进制信号。由于压力波在传输过程中的损耗较大,以及泥浆中泥沙等颗粒对传输精度造成一定影响,泥浆脉冲传输的方式传输速率较低,一般只有2~5 bit/s<sup>[6-7]</sup>。声波随钻测量是通过在钻杆内部装置声波发射器和接收器,借助声波在地下介质中的传播特性来采集地下结构信息。声波传输无须钻井液,对各类地质条件具有良好的适应性,且传输速率较高。然而,在复杂的地质条件下,声波的多次反射和折射会增加信号解析的复杂度。随钻电磁测量(EM-MWD, electromagnetic measurement while drilling)是一种无线探测技术,在钻井过程中通过电磁波传输地下信息。电磁波传输方式具有无须钻井液充当媒介、传输速度较快、成本低等优点<sup>[8-10]</sup>。但是电磁波信号在地层中的衰减较大、传输距离受限一直是国内外EM-MWD系统普遍存在的问题。

我国在EM-MWD领域的探索已取得一定成果,现行EM-MWD系统仍为单向传输,对双向EM-MWD的研究仍处于初级阶段。对于双向传输系统,中国地质大学姚爱国教授团队展开了大量的研究,初步进行了双向EM-MWD实测,实测结果表明,该装置能够实现电磁波信号的双向传输<sup>[11-12]</sup>。然而,该设备缺乏随钻测量功能,其传输深度达到68 m,但是在后续的研究中,并未对系统的传输速率和距离等关键因素进行深入探讨。此外,国内外电磁随钻测量系统传输速率普遍不超过20 bit/s,其中,APS公司研发的SureShot EM-MWD数据传输速率为1~12 bit/s,我国中海油服务公司在2020年首次测试自主研发的随钻高速率脉冲器,其速率最高可达12 bit/s<sup>[13]</sup>。

当前EM-MWD系统主要为单向传输且传输速率较低,导致地面上无法实时控制井下设备的运行,且无法保证所接收井下数据的准确性;电磁波在地层传输过程中衰减严重,致使信号传输距离受

限。针对上述问题,本文的主要贡献如下。

1) 研究了基于磁线圈激励的EM-MWD系统,对随钻杆传输的信号进行实测,刻画了随钻电磁无线传输的信道特性,并根据衰减特性选择合适的传输频段,以满足通信系统需求。

2) 针对现有随钻系统受限于单向传输和传输距离的问题,设计一种基于中继转发的双向随钻电磁传输协议。通过井上设备发送控制信号,由中继转发至井下机以控制井下机回传数据信号,从而实现双向传输。在随钻系统中,基于中继设备设计重传机制,对传输信号进行解码转发,以增加传输距离并确保信号可靠接收。

3) 针对EM-MWD系统性能提升的需求,设计随钻双向样机,主要包括天线、现场可编程门阵列(FPGA, field programmable gate array)、放大器、模数转换器(ADC)、数模转换器(DAC)和电源等关键设备。通过实测,验证随钻电磁系统基于中继转发的可靠双向传输方案,提升信号的传输距离和可靠性。

## 1 钻井探测无线信道特性

随钻电磁测量过程为井下机设备采集井下数据,然后将采集数据进行处理后通过井下天线以电磁波的形式进行传输,地面上天线将所接收的电磁信号传输至信号处理设备进行处理,以获取所需信息。随钻电磁信号传输系统结构如图1所示,其中,1为钻塔,2为钻孔,3为钻杆,4为钻杆之间连接处,5为井下机设备,6为井下收发天线,7为钻头,8为地面上收发天线,9为地面上信号处理设备。

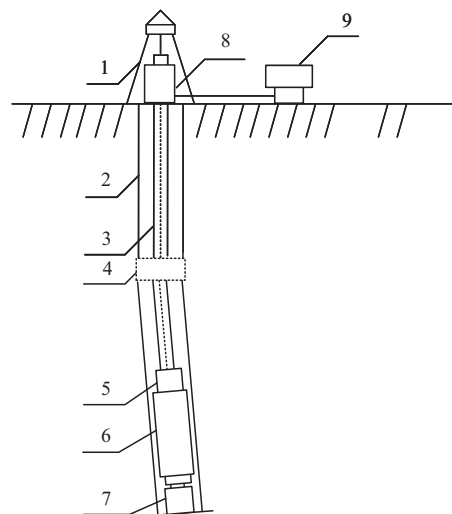


图1 随钻电磁信号传输系统结构

电磁波激励方式有多种, 本文选择磁线圈激励方式。磁线圈作为收发天线, 对整个随钻系统的传输效率以及可靠性有着至关重要的影响。本文选用锰锌铁氧体, 磁芯尺寸为 140 mm (外径) × 107 mm (内径) × 25 mm (高), 绕组选用直径为 1 mm 的漆包铜线。钻杆直径为 89 mm、单节钻杆长度为 1 m。为了测试所设计磁线圈天线的性能, 搭建了电磁随钻测量系统, 该系统包含收发天线、信号发生器、示波器、钻杆和电源设备。实测装置如图 2 所示。



图 2 实测装置

将发送端信号功率设为 10 dBm 且不加功放, 通过改变收发天线距离以及信号频率测得接收端信号功率, 所测结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 在载波频率保持恒定的条件下, 随着收发天线距离的增大, 电磁波在传播过程中的传输损耗会相应增加。这种损耗的增加主要是由于电磁波在传播过程中与环境中的物质相互作用, 产生散射、吸收等效应, 从而导致信号衰减。因此, 接收端信号功率呈现出逐渐减小的趋势。

在固定收发天线距离的情况下, 深入探讨了电磁波在钻杆传输过程中的特性, 因电磁波随钻杆传输受钻杆材质、钻杆尺寸、磁芯材质、磁芯尺寸等多种因素影响, 在频率为 3 MHz、5 MHz 和 20 MHz 时, 接收端信号功率达到了一个极小值。这表明在这些频率下, 电磁波的传输损耗较大。相反, 在频率为 4 MHz、7 MHz 和 15 MHz 时, 接收端信号功率达到了一个极大值。因此, 在这些频率下, 电磁波的传输效率较高。值得注意的是, 当频率超过 24 MHz 时, 接收端信号功率变化趋势变得相对平缓。这时电磁波的传输损失和增益达到了一种平衡, 使得接收端信号功率不再显著变化。

在图 3 中, 观察到在 20 m 和 25 m 处的接收幅值差异很小, 通过深入分析可以发现, 这是由于在不加功放的发送端, 其能够接收到并顺利解调的最远距离在 25 m 处。当发送端增加了功放之后, 发现接收端在 50 m 范围的接收幅值保持在一个较高的水平, 电磁波的传输特性得到显著改善。这个结果对于理解电磁波在钻杆中的传输特性, 以及设计和优化电磁通信系统具有重要的理论和实践意义。

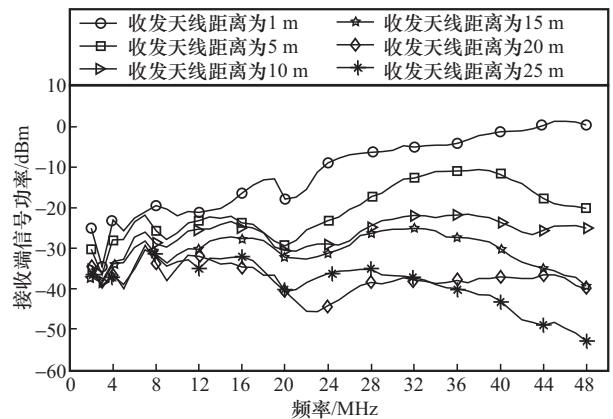


图 3 随钻系统信道特性

图 4 展示了在 7 MHz 和 48 MHz 频率下, 不同距离 (1 m、10 m) 处的接收幅值。图 4(a) 和图 4(b) 分别代表了在 7 MHz 频率下的 1 m、10 m 的接收幅值, 图 4(c) 和图 4(d) 分别代表了在 48 MHz 频率下的 1 m、10 m 的接收幅值。在 7 MHz 频率下, 随着距离的增加, 接收信号的幅值衰减相对较小, 保持在一个合理的范围内。但当频率提升至 48 MHz 时, 在 1 m 和 10 m 之间, 接收信号的幅值变化明显, 差值达到 30 dB, 这个幅值衰减不利于进行随钻双向通信实验。

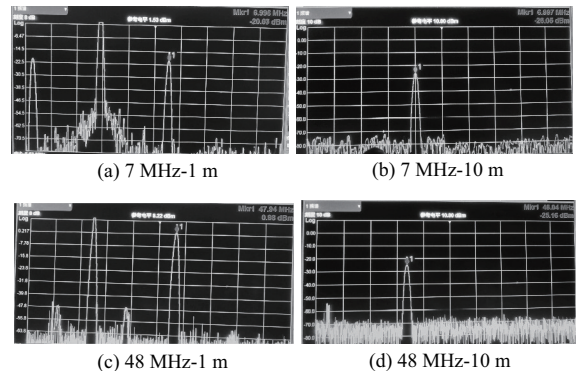


图 4 在不同距离和频率下的接收幅值

基于上述分析和实测结果，4 MHz 和 7 MHz 表现出较好的稳定性和一致性。此外，这 2 个频率范围的选择也考虑到了实际硬件实现，可使用 FPGA 进行振荡生成所需频率，进而优化系统设计。因此，本文系统选择 4 MHz 和 7 MHz 这 2 个频率范围用于后续频移键控（FSK）的设计与测试。

## 2 双向中继通信协议设计

国内现有电磁随钻系统均为单向传输，仅实现井下采集数据传输至地面，从而导致地面无法控制井下设备运行，且无法确保接收数据的可靠性。同时，电磁信号在地层中的衰减，很大程度上限制了电磁波的传输距离。如何实现信号的双向传输以及提高信号传输距离，是电磁随钻系统研究的重要内容。针对以上问题，本文提出了基于中继转发的随钻电磁双向传输系统。系统框架如图 5 所示。

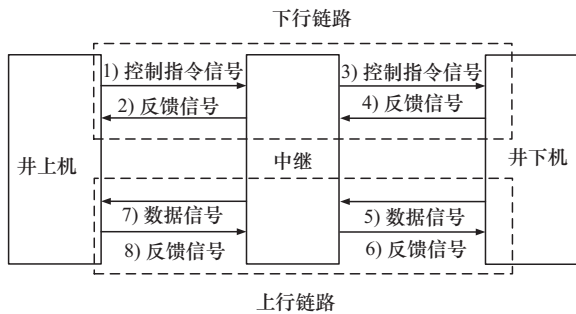


图 5 系统框架

系统主要包括井上机、中继与井下机设备，三者都能实现信号的收发。系统包含上行链路和下行链路，下行链路为井上机-中继-井下机发送控制指令信号，上行链路为井下机-中继-井上机接收数据

信号。上行链路和下行链路都包含了重传机制，保证控制指令信号和数据信号可以被接收方完整无误地收到。

在随钻测量过程中，无线信道的不稳定性会导致系统在数据传输时出错，使接收方接收到错误的数 据。为了保证接收到数据的准确性，在系统中引入自动重传请求（ARQ, automatic repeat request）机制<sup>[14-15]</sup>。本文数据帧包括帧头、用户位、序列号、长度位、数据位、校验位。ARQ 使用序列号为每个数据帧提供唯一的标识，其中包括发送数据嵌入序列号（SN）和接收反馈序列号（RN）。若数据正确且 SN 等于 RN，则将 RN 加 1，并将 RN 随反馈信号发出；若数据错误，则不发出任何信号；若数据中 SN 不等于 RN，RN 保持不变，将 RN 随反馈信号发出。

### 1) 井上机设计

井上机发送时，井上机 FPGA 首先通过串口模块接收处理器发送的控制指令信号，接收到控制指令信号后，将其存储到内部存储模块，并将其进行编码、组帧、调制和数模转换，以电磁波的形式发送。井上机接收到中继发送的反馈或数据信号后，进行模数转换、解调、采样判决、帧同步、解码以及校验，并将正确的数据送入存储模块。存储模块中存储的数据通过串口模块送入处理器中进行后续的数据处理。井上机 FPGA 内部主要模块框架如图 6 所示。

系统启动时，井上机进行下行链路发送。井上机向井下机发送控制指令信号，并进入等待时间  $T_1$ 。在  $T_1$  内，若没有收到来自井下机的反馈信号，则重新发送控制指令信号；若收到反馈信号，则井上机下行链路发送状态结束，等待接收井下机上行

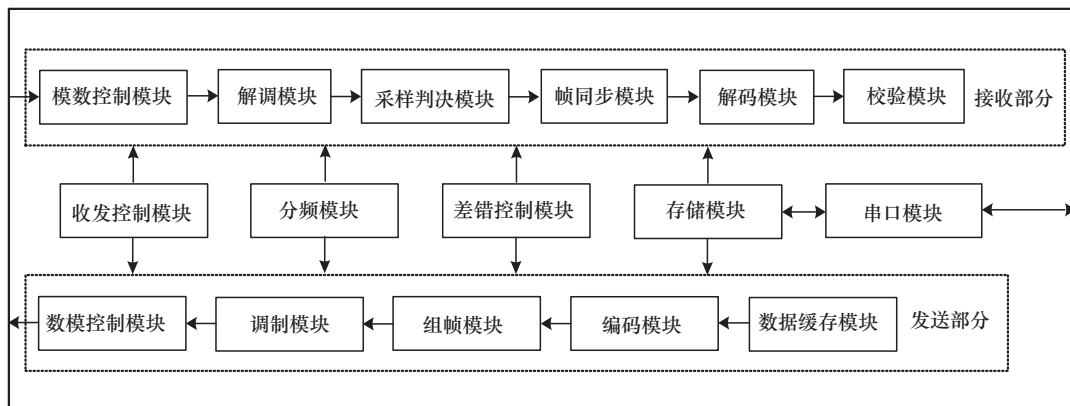


图 6 FPGA 内部主要模块框架

链路发送的数据信号。

井上机上行链路接收是在井上机下行链路发送结束后进行的, 此时井上机等待接收井下机的数据信号。井上机接收到数据信号后, 依次进行循环冗余校验 (CRC, cyclic redundancy check)、用户位校验和 SN 校验。若 CRC 错误, 则不发送任何反馈信号; 若 CRC 正确、用户位校验错误, 同样不发送任何反馈信号; 若 CRC 和用户位校验正确、SN 错误, 则向井下机发送负向反馈 (NACK, negative acknowledgement) 信号, 其中 RN 等于 SN; 若 CRC 和用户位校验正确, SN 校验正确, 则向井下机发送正向反馈 (ACK, acknowledgement) 信号, 其中 RN 等于 SN 加 1。井上机正确地接收到最后一组数据并发送 ACK 信号后, 进入等待时间  $T_2$ 。在  $T_2$  内, 井上机无法判断反馈信号是否被井下机准确接收到, 其仍处于接收井下机数据信号的状态。同时, 井上机对  $T_2$  内接收到的所有数据进行寄存。若再次正确地收到来自井下机发送的最后一组数据, 则重新发送 ACK 信号; 若没有正确地收到, 则对  $T_2$  内收到的所有数据与最后一组数据根据序列位进行互相关运算。根据互相关结果, 判断井下机是否重发了最后一组数据。若没有, 则井上机上行链路接收结束。上行链路接收结束后, 将接收到的数据发送到处理器, 并等待处理器发送下一组控制指令信号。井上机上行链路接收流程如图 7 所示。

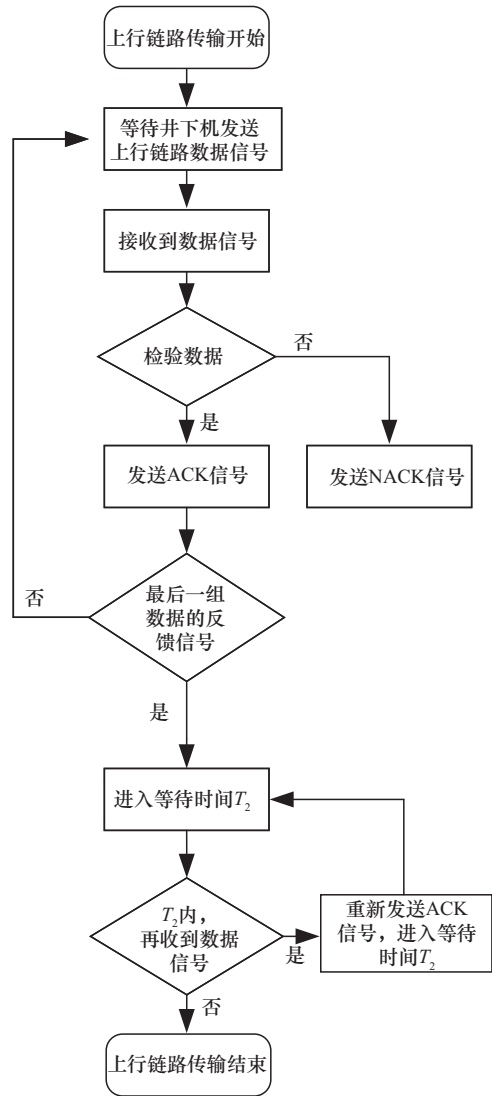


图 7 井上机上行链路接收流程

### 2) 中继设计

中继是无线通信系统中一个不可或缺的部分, 尤其在长距离、大范围或复杂环境中。中继是负责接收和重新发送无线信号的设备。在无线信号传输过程中, 由于地理环境、建筑物遮挡或其他因素的影响, 信号在传输过程中会逐渐减弱。中继站通过捕获这些衰弱的无线信号, 对其进行放大和重新发送, 以扩展信号的覆盖范围, 克服信号衰减。中继在接收到来自源节点的信息后, 采用解码转发 (DF, decode and forward) 协议, 对接收到的信息进行解码处理, 然后重新编码后发送到目的节点<sup>[16]</sup>。通过解码转发, 中继节点恢复源节点的信息, 同时消除了源节点到中继节点链路上的噪声对目的节点的影响, DF 示意如图 8 所示。

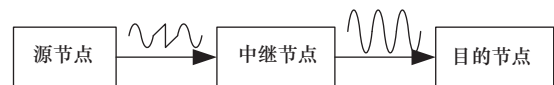


图 8 DF 示意

通过在不同阶段执行不同的功能, 中继设备实现信号的有效转发和数据的可靠传输。相较于井上机与井下机, 中继设备在功能实现上与之类似。在下行链路发送阶段, 中继设备首先与井上机进行信息交互, 此时其功能与井下机相同, 负责接收并处理来自井上机的控制指令信号。当井上机与中继设备的下行链路传输任务完成后, 中继设备对接收到的控制指令信号进行重新编码, 并将其发送至井下机, 此时中继设备的功能与井上机相同, 确保控制指令信号能够准确可靠地传达至井下机。

中继设备在完成下行链路任务后, 转入接收状

态，等待接收井下机发送的数据信号，此时中继功能与井上机相同。与井下机的上行链路发送交互结束后，中继设备对接收到的信号进行重新编码，并依次将处理后的数据信号发送至井上机，完成上行链路传输任务。在这一过程中，中继设备的功能与井下机相同，确保数据信号能够准确可靠地传达至井上机。

### 3) 井下机设计

井下机下行链路接收过程中，井下机保持在初始状态，等待接收井上机控制指令信号。接收到控制指令信号后，校验信号是否正确。若不正确，不发送任何信号；若正确，则向井上机发送反馈信号，并进入等待时间  $T_3$ 。在  $T_3$  内，若再次正确地收到来自井上机发送的控制指令信号，则重新发送反馈；若没有正确地收到，则对  $T_3$  内收到的所有数据与控制指令信号根据 RN 和 SN 进行互相关运算。根据互相关结果，判断井上机是否重新发送了控制指令信号。若没有，则井下机下行链路接收结束。井下机上行链路发送是在下行链路接收结束后，井下机将串口模块接收到的数据进行组帧，并依次发送到井上机。一帧数据发送完成后，进入等待时间  $T_4$ 。在  $T_4$  内，若收到来自井上机的 ACK 信号，则发送下一组数据；若收到 NACK 信号，则重发这一组数据；若 ACK 和 NACK 均未收到，则在  $T_4$  结束后，重发这一帧数据。当井下机最后一帧数据发送完成且收到了来自井上机的 ACK 信号，井下机上行链路发送结束，等待接收控制指令信号，进行下一组数据的发送，井下机上行链路发送流程如图 9 所示。

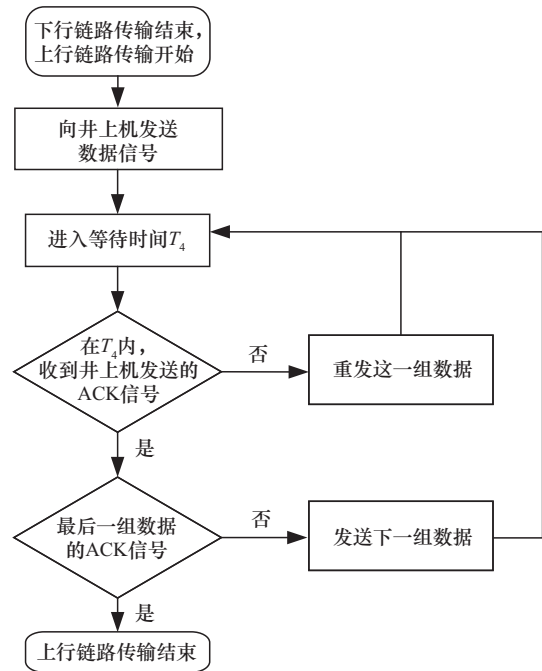


图 9 井下机上行链路发送流程

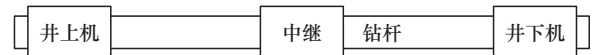


图 10 系统整体框架

系统中每一节点都包括 FPGA、ADC、DAC、功率放大器、微弱信号放大器、自动增益放大器、正负电源、收发天线与供电设备等。其中，接收天线将接收到的模拟信号送入由微弱信号放大器与自动增益放大器构成的接收端放大电路中进行信号放大，放大后的信号送入 ADC 中进行模数转换，转换后的数字信号送入 FPGA 中进行信号处理。FPGA 中要发送的信号首先送入 DAC 中进行数模转换，转换后的模拟信号送入功率放大器中进行放大，放大后的信号通过发射天线以电磁波的形式发送出去。系统中硬件模块框架如图 11 所示。

首先，对放大电路部分进行验证，如图 12 所示。

### 3 随钻样机搭建与实测

本节对随钻系统进行搭建、验证与实测。该系统主要包括井上机、中继、钻杆与井下机，其框架如图 10 所示。

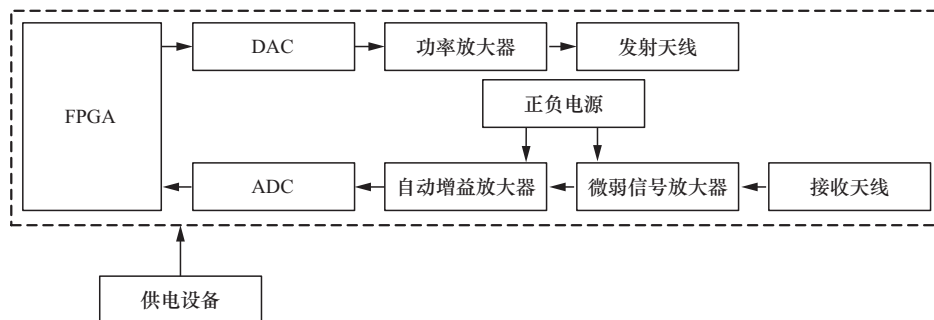
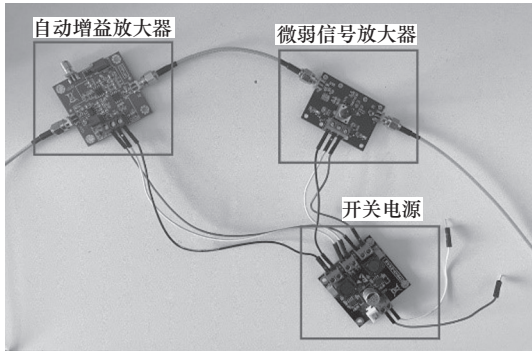
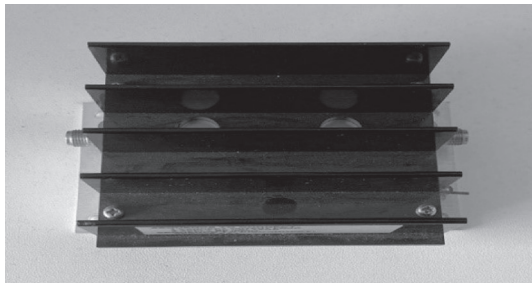


图 11 硬件模块框架



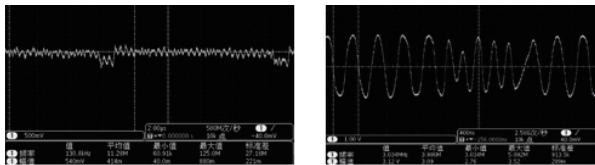
(a) 接收端放大电路



(b) 发送端放大电路

图 12 放大电路

接收端放大电路由微弱信号放大器和自动增益放大器组成，发送端放大电路由功率放大器组成。在收发端距离 30 m 处时，图 13 给出了引入放大器前后示波器显示结果。通过实测，验证了放大器的放大效果。



(a) 无放大电路

(b) 添加放大电路

图 13 示波器时域波形

接下来，对系统的收发功能进行测试，测试系统包括发送端和接收端，收发端 FPGA 连接放大器电路，收发端距离 30 m。通过 SignalTap II 查看接收端 FPGA 接收的信号，接收信号如图 14 所示。

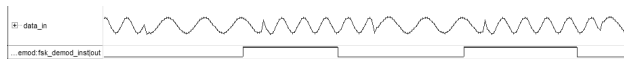


图 14 接收端 FPGA 中 FSK 解调模块波形

接收端 FPGA 将采样判决后的数字信号通过串口发送到计算机。经验证，系统收发功能符合设计要求。

为了更清晰地展示整个系统，在实验室环境进行验证，搭建包含两级中继的 EM-MWD 双向传输系统，钻杆总长度为 105 m。系统包含井上机、井下机和两级中继，井上机和井下机位于钻杆两端，中继位于钻杆中间。系统实测如图 15 所示。



(a) 发送端

(b) 接收端

图 15 系统实测

在井下机 FPGA 设备存储器中写入如图 16 所示的十六进制数据。通过控制井上机发出控制信号后，中继将控制信号重新编码后发送到井下机。井下机收到井上机的控制信号后，将存储器中 5 帧数据，即 320 bit 有效数据通过组帧、编码、调制等一系列处理，再通过中继转发到井上机。井上机 FPGA 接收到数据后，通过串口发送到计算机。图 17 给出了计算机接收到的数据。

从图 17 中可以看出，经过 10 次传输，井上机接收到了 3 200 bit 数据，且数据准确无误。本文所提系统的 FPGA 系统码元速率为 250 kbit/s，设数据信号的传输时间为  $t$ ，反馈信号的传输时间为数据信号的 0.25（即  $0.25t$ ），经过两级中继直传到井下机时，因此需要 3 倍的传输时间。考虑到数据帧包括帧头、用户位与校验位等冗余信息，有效数据在数据帧中占 70%。因此，本文所提系统中有效数据传输速率为

$$\frac{250t}{3(t + 0.25t)} \times 0.7 = 46.67 \quad (1)$$

Addr	+0	+1	+2	+3	+4
0	5155535432303137	5155535432303231	43554d5432303231	43554d5432303234	3230323331313232

图 16 井下机 FPGA 设备存储器数据

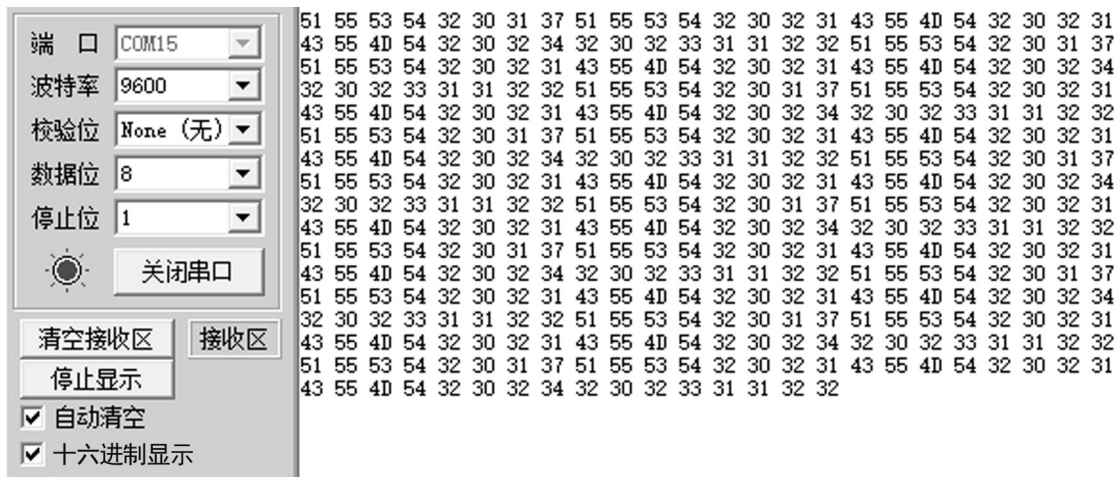


图 17 井上机计算机接收到的数据

经实测，所研制系统单跳传输距离大于 30 m，添加两级中继后，传输距离可达到 100 m。

#### 4 结束语

针对国内电磁随钻测量系统普遍存在的单向传输、可靠性低以及传输距离受限等问题，本文提出了一种新颖的基于中继接力的随钻电磁双向传输系统。首先，对电磁随钻系统的信道特性进行了详细的实测，基于实测数据，选取了适宜的传输频段，以确保信号传输的高效与稳定。随后，利用 FPGA 的高性能与灵活性，实现了 FSK 调制解调、CRC 编解码、采样判决与反馈重传等关键模块，并通过仿真验证确保了各模块的正确性与有效性。这些模块的引入不仅提升了信号处理的效率，还增强了系统对噪声和干扰的抵抗能力。为了进一步拓展传输距离并提升系统的可靠性，搭建了一个带有中继转发的电磁随钻双向传输系统。通过引入中继设备，使得电磁波信号能够在更远的距离内得到有效传输，提升了系统的覆盖范围。同时，设计了基于 FPGA 的双向通信协议，确保了电磁信号的双向可靠传输。通过实际测试，验证了本文所提方案的优异性能。相比于现有单向传输方案，本文方案优势在于可实现高速、可靠的数据双向传输，由井上地面控制井下系统进行探测并传回实时数据。井上机直传到井下机时，有效数据传输速率在 100 kbit/s 以上，单跳传输距离在 30 m 以上。目前在实验环境已测试实际单跳传输距离可达 50 m，后续的工作主要集中在保持 kbit/s 级别的传输速率前提下增加单跳传输距离。

#### 参考文献:

- [1] 石智军, 李泉新, 姚克. 煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2217-2224.  
SHI Z J, LI Q X, YAO K. Development path and key technology analysis of intelligent directional drilling in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2217-2224.
- [2] ZHANG C, DONG H B, GE J, et al. Theoretical channel model and characteristics analysis of EM-MWD in the underground coal mine[J]. IEEE Access, 2021, 9: 142644-142652.
- [3] 陈泽平, 闫保永, 王国震, 等. 煤矿井下随钻测量技术研究现状及展望[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(6): 130-134.  
CHEN Z P, YAN B Y, WANG G Z, et al. Research status and prospect of MWD technology in coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(6): 130-134.
- [4] 郝世俊, 褚志伟, 李泉新, 等. 煤矿井下近钻头随钻测量技术研究现状和发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 10-19.  
HAO S J, CHU Z W, LI Q X, et al. Research status and development trend of near-bit MWD in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(9): 10-19.
- [5] 刘海军. 随钻测量数据传输方式的现状和发展趋势[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(4): 67-71.  
LIU H J. Present situation and development trend of data transmission mode of measurement while drilling[J]. West-China Exploration Engineering, 2014, 26(4): 67-71.
- [6] 王正辉. 连续波泥浆脉冲传输系统设计[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.  
WANG Z H. Design of continuous wave mud pulse transmission system[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [7] 许江明. 随钻泥浆脉冲遥传系统信道与同步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

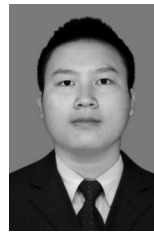
XU J M. Study on channel and synchronization of mud pulse remote transmission system while drilling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

- [8] DEGAUQUE P, GRUDZINSKI R. Propagation of electromagnetic waves along a drillstring of finite conductivity[J]. SPE Drilling Engineering, 1987, 2(2): 127-134.
- [9] TIAN X C. Design and implementation of linear power supply for wireless electromagnetic wave MWD system[C]//Proceedings of the 2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 391-394.
- [10] XIA M Y, CHEN Z Y. Attenuation predictions at extremely low frequencies for measurement-while-drilling electromagnetic telemetry system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(6): 1222-1228.
- [11] 姚爱国, 张萌, 吴来杰, 等. 电磁随钻信号传输技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(S1): 115-119.  
YAO A G, ZHANG M, WU L J, et al. Research on electromagnetic signal transmission technology while drilling[J]. Drilling Engineering, 2009, 36(S1): 115-119.
- [12] 邵养涛, 姚爱国, 张萌, 等. 电磁波随钻测量双向信号传输系统[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(3): 69-72.  
SHAO Y T, YAO A G, ZHANG M, et al. Electromagnetic wave bi-directional signal transmission of MWD[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(3): 69-72.
- [13] 张冲, 张爽, 王智明. 高速泥浆脉冲传输技术在随钻测井系统的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 7-12.  
ZHANG C, ZHANG S, WANG Z M. Application of high-speed mud pulse transmission technology in LWD[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 7-12.
- [14] 程渝, 程方, 张冰莹, 等. 5G 系统中无线链路控制层 ARQ 机制的研究及算法优化[J]. 现代电子技术, 2021, 44(19): 13-18.  
CHENG Y, CHENG F, ZHANG B Y, et al. Research and algorithm optimization of ARQ mechanism of radio link control layer in 5G system[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(19): 13-18.
- [15] LIN S, COSTELLO D J, MILLER M J. Automatic-repeat-request error-control schemes[J]. IEEE Communications Magazine, 1984, 22(12): 5-17.
- [16] LEI X F, FAN L S, HU R Q, et al. Secure multiuser communications in multiple decode-and-forward relay networks with direct links[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 3180-3185.

## [作者简介]



李世银 (1971-), 男, 四川犍为人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信和移动目标定位。



张博文 (1999-), 男, 湖南湘潭人, 中国矿业大学硕士生, 主要研究方向为随钻测量、无线通信等。



张冠杰 (1999-), 男, 山东济宁人, 中国矿业大学硕士生, 主要研究方向为随钻测量、语义通信等。



张志 (1998-), 男, 四川资阳人, 中国矿业大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



祁华艳 (1999-), 女, 安徽凤阳人, 中国矿业大学硕士生, 主要研究方向为无线通信。



王勃 (1984-), 男, 安徽安庆人, 博士, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为深地探测。