

基于长距离同轴电缆混合信号全双工传输系统的设计与实现

董磊

第七一五研究所, 浙江 杭州 310023

DOI: 10.61369/TACS.2026070051

摘 要 : 针对矿产探测数据、测井系统在远程传输存在困难等问题, 文章提出了一种基于长距离同轴电缆全双工传输技术, 该技术可在无中继的 3700 米的同轴电缆上进行双向数据传输, 并进行供电传输。上行数据使用曼彻斯特编码方式, 对数据进行编码后通过驱动电路发送到同轴电缆中, 在接收端使用选频电路、时钟同步与恢复电路对上行数据进行解析; 下行使用特定脉冲信号, 通过对不同脉冲信号的组合来区分不同的命令, 在接收端通过放大电路、选频电路、整形电路和比较电路将组合个脉冲信号送到主控, 主控通过对脉冲信号进行解析来识别不同的命令, 从而实现双向数据传输。此技术还可通过同轴电缆输送电源到 B 端, 给 B 端模块供电。通过搭建测试系统, 使用实际电路进行验证。结果表明, 该技术可以实现远距离同轴电缆的双向数据传输及供电, 解决了水下传感器的供电及数据传输, 对实际工程具有指导作用。

关 键 词 : 同轴电缆传输、混合传输、全双工系统

Design and Implementation of a Full-Duplex Transmission System for Hybrid Signals over Long-Distance Coaxial Cables

Dong Lei

The 715th Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310023

Abstract : In response to issues such as difficulties in the remote transmission of mineral exploration data and logging systems, this paper proposes a full-duplex transmission technology based on long-distance coaxial cables. This technology enables bidirectional data transmission and power supply over a 3700-meter coaxial cable without the need for repeaters. For uplink data transmission, Manchester coding is employed to encode the data before sending it through the driving circuit to the coaxial cable. At the receiving end, a frequency-selective circuit, clock synchronization, and recovery circuit are used to decode the uplink data. For downlink transmission, specific pulse signals are utilized, with different commands distinguished by combinations of these pulses. At the receiving end, an amplification circuit, frequency-selective circuit, shaping circuit, and comparison circuit are employed to deliver the combined pulse signals to the main controller, which decodes the pulse signals to identify different commands, thereby achieving bidirectional data transmission. This technology can also transmit power to terminal B through a coaxial cable to supply power to the modules at terminal B. A test system was constructed and validated using actual circuits. The results demonstrate that this technology can achieve bidirectional data transmission and power supply over long-distance coaxial cables, addressing the power supply and data transmission challenges for underwater sensors and providing guidance for practical engineering applications.

Keywords : coaxial cable transmission, hybrid transmission, full-duplex system

绪论

近年来, 随着科技的飞速发展, 人们对矿产资源的需求日益增长, 在矿产资源探测中, 准确地了解地下矿产资源的具体信息至关重要。在井下数据传输系统中, 由于井下高温、高压等恶劣环境的影响, 通常使用同轴电缆作为传输介质, 同轴电缆具有出色的抗干扰性能, 能够有效抑制环境噪声的影响。本文选择同轴电缆作为传输介质, 设计并实现了一种基于同轴电缆长距离复合信号传输的全双工系统, 可以有效满足远距离、高速数据传输的要求^[1]。经过实际测试, 通信情况良好, 丢包率较低, 对基带同轴电缆传输具有参考意义。

本文的结构如下, 第二节介绍了系统总体设计, 第三节介绍了系统的详细设计, 包括电能传输的选择、电缆传输特性介绍、数据及命令传输的设计方案, 第四节介绍了系统搭建及性能测试。最后对本文进行总结。

一、整体设计框图

同轴电缆数据与电源混合全双工传输系统是利用同轴电缆实现直流供电电源、数据信号和控制命令的一种复合传输系统,通过设计相关分离电路来实现这三种信号实时传输工作。它是海洋数据采集、传输与控制的关键链路。此传输系统主要由 A 端系统、B 端系统以及同轴电缆组成。通过研究同轴电缆的传输特性来设计控制命令、数据信号和直流电源信号的传输频率,实现无干扰的传输。传输系统框图如图 1 所示。

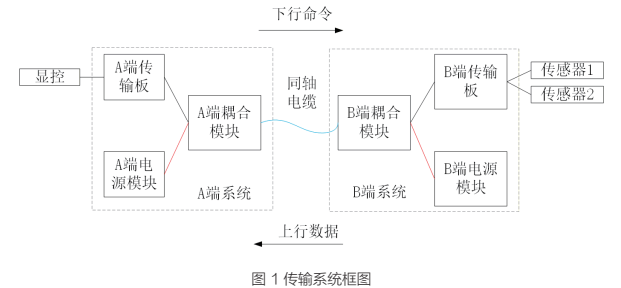


图 1 传输系统框图

二、详细设计

A 端系统和 B 端系统均由电源模块、传输模块和耦合模块组成,但其电路形式和实际功能却有所不同。

(一) 输送电源选择

目前电能传输主要由交流输电和直流输电两种方式。由于交流输电受限于输送距离、输送功率等因素;直流输电常用于远距离供电,并且直流输电的线路损耗小,对数据传输的干扰远小于直流电,适合于点对点长距离传输,因此采用高压直流输电方式来传输电能^[2-3]。A 端系统中的电源模块将 AC220V 转换为 DC300V,再通过无中继的 3700 米同轴电缆输送到 B 端系统的电源模块,给整个 B 端系统供电。这种供电方式可有效解决水下大功率锂电池供电的弊端,有效节约使用成本和维护成本。

(二) 同轴电缆传输特性

同轴电缆传输技术主要采用了单铜线作为核心材料且会外包同轴铜管,其传导性较好,可以有效避免电磁波以及外界载波等因素的影响^[4]。它主要是由内外两层导体构成,内导体通常为铜芯,外导体通常为屏蔽网,内外导体间由一层聚乙烯将其隔开,若有承力要求,通常还需外加铠装结构,增加电缆的承重能力。3700 米同轴电缆实测传输特性如下。同轴电缆在高频部分衰减大,在低频部分衰减较小,传输特性类似于低通滤波器。同轴电缆的信号衰减与传输信号的频率以及同轴电缆的结构等相关。它的衰减通常包括导体衰减、介质衰减以及失配损耗构成,导体衰减与介质衰减是由于信号在同轴电缆的内导体、外导体及内外导体间的绝缘层之间传播导致,而失配损耗主要是指电缆的结构不均等物理结构引起的损耗^[5]。本方案使用直流供电的方式,直流信号的频率为 0Hz,下行命令通常为事件型触发,因此数据量并不大,可选用 1kHz~50kHz 作为下行命令频段,上行数据为周期型,上传周期可由下行控制命令控制,为了与下行命令区分,本

文选用 300k~1MHz 作为上行数据的频带。3700 米同轴电缆的衰减特性如图 2 所示。

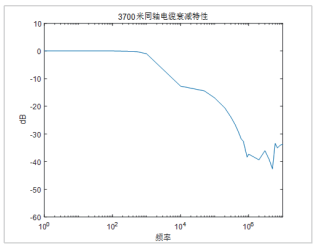


图 2 3700 米同轴电缆衰减特性

(三) 数据传输和命令传输

同轴电缆数据与电源混合传输系统主要是实现数据或命令在 3700 米同轴电缆上的实时传输,我们规定由命令由 A 端到 B 端的过程称为下行命令,数据由 B 端到 A 端的过程称为上行数据。

1. 下行链路传输

A 端传输模块中的主控接收到控制命令后,将控制命令转换为特定脉冲信号,通过对特定脉冲信号的组合来表示不同的命令信号,将命令信号送到驱动芯片中,增加命令信号的驱动能力,再通过耦合模块将命令信号与电源信号耦合在一起通过同轴电缆传输到 B 端耦合板,在 B 端耦合板中将命令信号与电源信号分离,电源信号通过 B 端电源模块将 DC300V 高压信号进行转换,供 B 端传输模块和负载供电,命令信号经过放大、滤波、整形、比较和电平转换后送给 B 端传输模块的主控芯片。下行链路传输框图如图 3 所示。

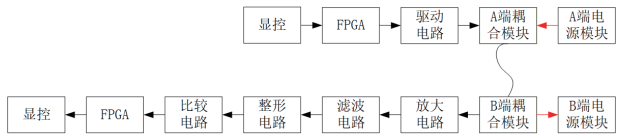


图 3 下行链路传输框图

2. 上行链路传输

B 端传输模块中的主控接收到上行数据后,在主控芯片中进行数据编码,将编码后的数据信号以特定频率送到驱动芯片中,增加驱动能力,提高传输能力,再通过耦合模块和同轴电缆后到达 A 端,电缆传输后的编码信号通过宽带的带通滤波器对信号进行放大和滤波,再经过一路比较器对数据信号进行整形,将整形后的信号送到 A 端传输模块中的主控芯片,主控芯片对信号进行取或后输出到锁相环 PLL 中,使锁相环产生恢复解码信号的时钟,再将这个时钟信号送到主控芯片后进行解码,最后对解码后的信号进行数据处理,完成数据传输及处理。上行链路传输框图如图 4 所示。

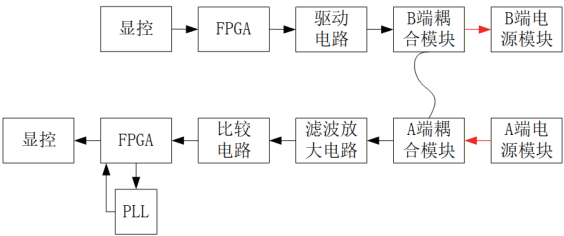


图 4 上行链路传输框图

（四）滤波电路设计

对于下行链路而言，由于控制命令是通过双方约定的特定频率的脉冲信号来识别，因此，在对下行链路中的滤波器设计时仅需对特定频率的信号进行识别即可。本次设计中下行命令的信号频率为16kHz，设计了4阶巴特沃斯带通滤波器，带宽6kHz，截止频率分别为12kHz和18kHz，对400kHz以上的高频信号衰减70dB以上，下行链路滤波器频率响应如图5所示：

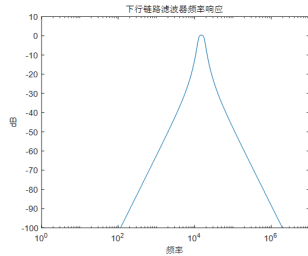


图5 下行链路滤波器频率响应

对于上行链路而言，当不发送数据器件，FPGA一直发送400kHz的时钟；当发送数据时，需要对原始数据进行曼彻斯特编码后进行传输，编码后数据的波形经过3700m同轴电缆的传输，高频部分细节已被衰减，在设计滤波器时要考虑对高频部分的细节进行补偿，整个带通滤波器由3阶低通滤波器和1阶高通滤波器组成，带宽1MHz，通过搭建放大电路对特定信号进行放大。上行链路滤波器的频率响应如图6所示：

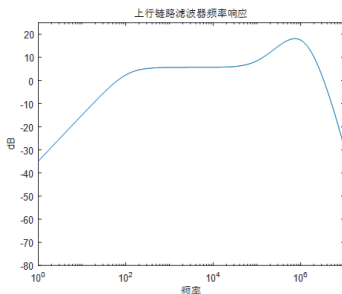


图6 上行链路滤波器频率响应

（五）PLL 电路设计

在上行数据解码过程中，需要对时钟进行提取，本方案采用专用锁相环芯片HC4046来实现，将经过时域均衡器整形后的曼彻斯特信号在FPGA中进行取或后输出到锁相环14引脚（CKR），经过锁相环恢复出曼彻斯特编码时钟，由锁相环4引脚输出（RXCLK）。在不使用频率偏移的情况下，R2可不外接电阻，压控振荡器（VCO）的中心频率只由R1和C1A和C1B之间的电容值决定，在R1处外接电位器来调节阻值，可改变VCO的中心频率，以适应不同的传输速率，同时选择PC1out作为输出，进行调整输出信号的频率与相位，并消除鉴相器两个输入之间的相位差。

三、系统搭建及性能测试

为了验证本通信系统的可靠性与稳定性，通过搭建实际电路对本系统进行测试，测试连接示意图如图7所示。使用市电AC220V

给A端电源板、两台PC机以及电子负载供电，A端电源板输出 $\pm 12V$ 给A端传输板供电，同时输出DC300V经A端耦合板以及3700m同轴电缆再通过B端耦合板给B端电源板供电，B端电源板输出 $\pm 12V$ 给B端传输板供电，PC机分别给A端传输板和B端传输板按照一定协议提供测试数据，关键信号的波形如图7所示。

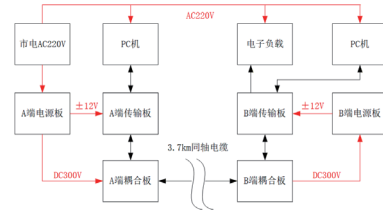


图7 系统测试示意图



图8 下行滤波器输入输出波形

通过图8中的输入输出波形可以看到，经过3700米同轴电缆和耦合板的传输，夹杂了其他频率的噪声，通过设计图6中的带通滤波器，将有用信号和噪声进行分离，得到干净的16kHz的正弦信号。



图9 下行整形电路及比较电路的输出

通过对滤波后的电路进行整形，再经过电平转换电路进行电平转换，将转换后的信号发送给FPGA进行命令识别，从而判断下行命令。

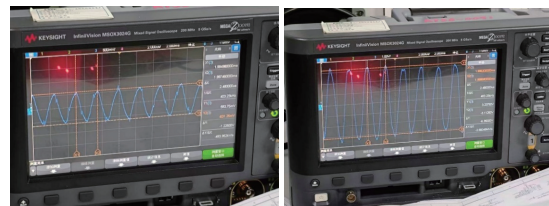


图10 上行耦合板输出及滤波放大后的信号

曼彻斯特编码后的上行信号经过3700米同轴电缆和B端耦合板的传输，其高频部分已被衰减，通过宽带滤波放大，再经比较判别对信号进行恢复。



图11 锁相环时钟输出与数据波形

图 11 中, 绿色为数据输入, 蓝色为 PLL 时钟输出, 经过 40min 拷机测试, 借助示波器的余晖效应观察数据与时钟的关系, 波形比较饱满, 且眼图较大, 通信质量良好。

上行测试方法: PC 机打开串口调试助手, 每次发送 85 字节, 100ms 定时发送数据, 测试 40 分钟, 共收到 2033064 字节, 发送 2040000 字节, 接收率为 99.66%。

下行测试方法: PC 机打开串口调试助手, 在上行数据传输的过程中, 每次发送 6 字节, 以 500ms 定时发送, 测试 3min, 湿端

接收到 360 包数据, 下行正常传输, 未出现丢包。

四、总结

本文设计并实现了一种基于长距离同轴电缆混合信号传输的全双工系统, 经过多次试验验证, 能够按照设计需求稳定地运行并能够完成数据传输任务, 这项技术可应用于深海考察、海洋资源探测和测井系统等多个领域中。

参考文献

- [1] 张虎, 谭博, 陈子龙. 基于时域均衡的 HDB3 数据传输系统设计 [J]. 声学电子工程, 2017, (2): 29-31.
- [2] 钟川源, 刘敬彪, 陈顺举. 基于同轴电缆混合传输技术的研究 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2008, (1): 4-7.
- [3] 刘敬彪, 刘洋, 盛庆华. 基于同轴电缆的能源传输与数据信息混合传输技术中数据耦合器的设计与实现 [J]. 热带海洋学报, 2009, 28(4): 6-11.
- [4] 刘晓兴. 通信工程中有线传输技术的应用与发展探究 [J]. 电子世界, 2021, (7): 25-26.
- [5] 简伟. 基于同轴电缆的能源与多路视频混合传输系统研制 [D]. 杭州电子科技大学, 2012.