

水文缆道信号传输系统设计及应用

谭玺¹, 张利²

¹长江大学电子信息与电气工程学院, 湖北 荆州

²长江水利委员会水文局荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州

收稿日期: 2025年9月26日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年12月24日

摘要

针对水文缆道水下信号传输稳定性差、抗干扰能力弱等问题, 本文提出了一种基于二进制频移键控(2FSK)调制解调的水文缆道水体回路通信系统。通过对比分析有线传输、无线电波传输及“无线”传输方式的优劣, 结合水体信道衰减大、噪声强的特点, 采用2FSK调制技术实现数字信号的高效传输。系统硬件以STM32控制板为核心, 结合AD5700调制解调芯片与OTL功率放大电路, 构建铅鱼通信模块与地面通信模块; 软件通过累加计数、快速傅里叶变换(FFT)及非相干解调算法优化信号处理流程。实验结果表明, 该系统在多个距离下均能稳定传输信号, 验证了2FSK调制解调在复杂水文环境中的可行性与可靠性, 为水文缆道数据传输提供了高效低成本的解决方案。

关键词

水文缆道, 二进制频移键控(2FSK), 水体回路通信, 抗干扰设计

Design and Application of Signal Transmission System for Hydrological Cableways

Xi Tan¹, Li Zhang²

¹School of Electronic Information and Electrical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

²Jingjiang Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changjiang Water Resources Commission (CWRC), Jingzhou Hubei

Received: September 26, 2025; accepted: October 21, 2025; published: December 24, 2025

Abstract

To address issues such as poor stability and weak anti-interference capability in underwater signal

文章引用: 谭玺, 张利. 水文缆道信号传输系统设计及应用[J]. 仪器与设备, 2025, 13(4): 689-697.

DOI: 10.12677/iae.2025.134083

transmission for hydrological cableways, this paper proposes a water-column loopback communication system based on binary frequency shift keying (2FSK) modulation and demodulation. By comparing the advantages and disadvantages of wired transmission, radio wave transmission, and “wireless” methods—while considering the characteristics of high attenuation and strong noise in water channels—the system employs 2FSK modulation technology to achieve efficient digital signal transmission. The hardware design centers around an STM32 control board, integrated with an AD5700 modem chip and an OTL power amplifier circuit to construct both submerged probe (lead fish) communication modules and ground station modules. Software optimization includes cumulative counting, fast Fourier transform (FFT), and non-coherent demodulation algorithms for streamlined signal processing. Experimental results demonstrate stable signal transmission across multiple distances, validating the feasibility and reliability of 2FSK in complex hydrological environments. This solution offers an efficient, low-cost approach for data transmission in hydrological cableway systems.

Keywords

Hydrological Cableway, Binary Frequency Shift Keying (2FSK), Water-Column Loopback Communication, Anti-Interference Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水文工作涉及防汛抗旱减灾、水资源开发与利用以及水生态保护。水资源数据收集和整理,天然河流的流速、流量、含沙量等信息的采集不仅对水文学科的发展具有重要意义,也为水资源的可持续管理与防灾减灾工作提供了技术保障。水文测验技术在我国具有独特的应用背景和重要性。目前国内外的流速流量测验方法主要包括:涉水测验法、桥测法、船测法和缆道测法。其中缆道测法是利用跨河缆道系统将测验平台运送到测验断面的指定垂线和测点处,由测验平台测量数据并通过缆道与水体组成的回路将数据传输到水文测站,它是国内最主要、最有效的水文信息测验技术[1]。

2. 水文缆道信号传输

缆道测流法的水下信号传输方式主要有以下三种:有线传输、无线电波传输和“无线”传输[2]。

有线传输,顾名思义是通过贯芯钢丝绳或利用主循环索与拉偏索构建的信号回路,将信号传回室内。其关键在于选用高质量的贯芯钢丝绳,并在缆道架设过程中做好线间绝缘处理,以减少信号的衰减。该方法对缆道的要求较高,还需额外架设拉偏索,导致投资成本增加,且使用寿命较短。

无线电波传输,传感器与室内接收装置无任何联结,完全依靠空中无线电波来传输信号。水下安装信号发射装置,通过起重索露出水面部分以无线电波方式发射,经过空中传输后由岸上接收机接收。例如刘泽文等人提出利用两个 VHF 超短波通信模块,使用超短波进行信号传输[3],由于无线电波在水体中传输时的衰减非常严重,所以这种方法的发射天线必须露出水面。有些厂家提出采用浮标天线或伸缩天线,但水面上有各类漂浮物会对天线产生破坏,从而影响系统使用稳定性。也有人提出先将传感器采集到的各类信号固态存储到本地,待装置提出水面后再由天线发射[4],笔者认为该方法虽然避免了天线不能在水里发射信号的问题,但是不能将测流信号及时传回缆道房,缺乏时效性。通过分析,无线电波传输有很大局限性,较少采用。

“无线”传输，是水文行业对“水体回路”传输方式的一种称呼。尽管其名称中包含“无线”，但实际上并非真正意义上的无线传输，而是通过缆道循环索(或主索)与水体共同构成传输回路[5]。如图1，该方式具有广泛的适用性，不受是否有拉偏索的限制，具备较强的抗干扰能力，并且安装便捷，维护检修也相对简单。本文所介绍的实现缆道水下信号传输，正是在此传输方式上进行的。

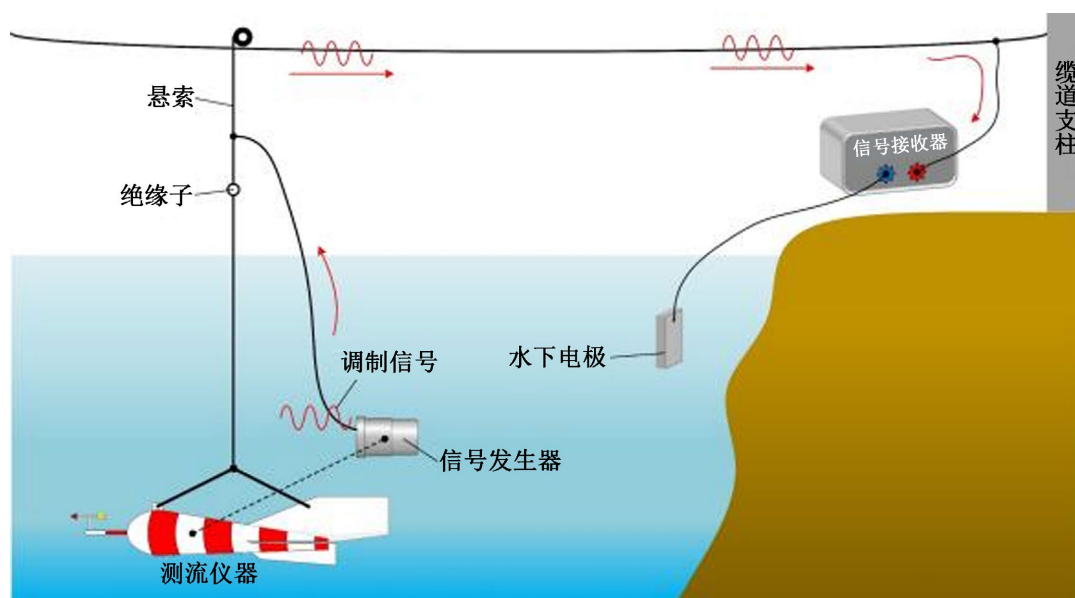


Figure 1. Schematic diagram of cableway water communication system
图1. 缆道水体通信系统示意图

3. 水下通信系统设计与实现

3.1. 传输信号

3.1.1. 信号类型

水体回路通信系统原理简化如图2。根据调研分析，目前应用在水文缆道上的水下信号“无线”传输方式主要包括水声通信、水下光学通信、水下电磁波通信和水下电通信。

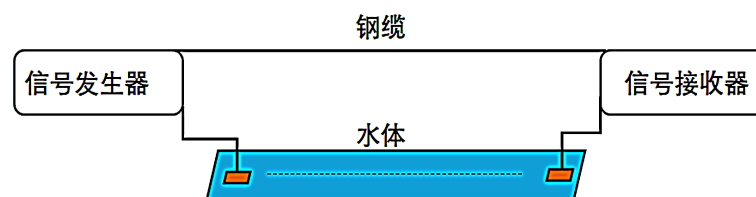


Figure 2. Schematic diagram of the cableway water communication system
图2. 缆道水体通信系统原理示意图

在水下环境中，水声通信和水下光通信在遇到障碍物或水体密度发生变化的情况下，声波和光波会出现反射、折射和散射等现象，进而影响通信质量和通信的稳定性；水下电磁波在水中衰减严重，在短距离通信中应用较多。水下电信号在缆道测验中一般有直流脉冲信号、交流音频脉冲信号和数据编码调制信号。

直流信号在水体中传输的衰减极其严重。距离短，由于水的电阻率远高于金属，信号强度会随距离迅速下降；能量损失大，大部分能量都用于驱动电解反应和发热，而不是用于传输信号；并且直流信号

只有正负两种，不能满足缆道上多信号的要求；无法传输高频信息，假设采用连续的直流方波脉冲信号作为传输信号[6]，笔者认为水体的电容效应会严重滤除信号中的高频成分，可能导致方波等波形产生畸变，比如想传输一个清晰的 0 “和” 1 “方波，接收端可能只能看到一个缓慢波动的电压。

一般多信号传输采用数据编码调制信号的方式，如图 3 所示。不同频率的交流信号在水中传输能力不同，频率越高传输能力越差、衰减越严重。缆道传输信号包括水面、河底、流速、采样器开关等多种信号，因此单一的低频率交流信号信息量不够，假如采用分频方式传输不同信号[5]，则分频调制电路成本高、频带不足。另外，通过调制，可以对信号进行加密或隐藏，从而提高通信的安全性，在一些特殊的河道及长江流域例如三峡流域等军事或者商业保密领域显得尤为重要。

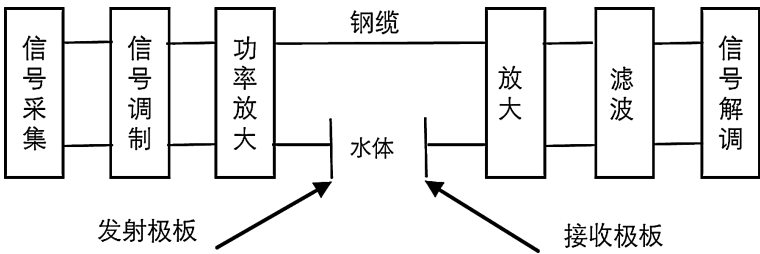


Figure 3. Water body loop communication system structure
图 3. 水体回路通信系统结构

信号调制类型有多种，其中二进制振幅键控(2ASK)，二进制频移键控(2FSK)，二进制相移键控(2PSK)、正交频分复用(OFDM)最为常见。

比较这几种方式，其优缺点见表 1。

Table 1. Comparison of data coding and modulation types
表 1. 数据编码调制类型对比

调制方式	优缺点	适用场景
2ASK	实现简单，易于理解和应用。 抗干扰、抗噪声能力弱，效率低。	对数据传输速率要求不高，通信距离较短的场景。
2FSK	容易实现，较强的抗干扰能力，有一定抗噪能力， 传输速率适中。	适用于需要较高抗干扰性能的通信环境，特别是在信道条件较差的情况下。
2PSK	抗噪性能较好，数据传输速率较高。易受外界干 扰，实现复杂。	需要精确的相位控制，高效利用频谱资源的场景。
OFDM	支持高速数据传输，实现相对复杂，需要较高的 硬件支持。	适用于需要高速数据传输的 Wi-Fi、4G/5G 移动通信等场景。

在缆道传输系统中，信号需通过水体介质进行传输。水体信道环境复杂，存在衰减大、噪声干扰强、多径效应明显等特点，对信号的稳定性和抗干扰能力提出了较高要求。

基于信道特性及各调制方式的优缺点，本系统选择二进制频移键控(2FSK)作为水体中的数据编码调制方式。2FSK 通过两个不同频率(f_1 代表 “1”， f_2 代表 “0”)的载波来传输数字信息，其核心优势在于：

1. 抗干扰能力：信号信息承载于频率而非幅度上，能有效克服水体信道中因衰减、扰动引起的信号幅度起伏，保障了数据传输的稳定性。
2. 抗噪声性能：与非相干检测方式结合，无需复杂的载波同步电路，实现简单，降低了系统复杂度，同时保证了在带限噪声环境下的可靠解码。

因此, 2FSK 调制方式非常适用于本缆道系统对可靠性、抗干扰性及实施成本的综合要求, 为实现水文数据的稳定、远程传输提供了理想的技术路径。

3.1.2. 2FSK 调制解调原理

2FSK 信号调制方法包括模拟调频法和数字键控法。这两种方法产生的信号波形大致相似, 但存在一些关键差异。模拟调频法生成的信号, 其相邻码元之间的相位是连续的; 而数字键控法则是通过两个独立的振荡器产生不同频率的载波, 因此其生成的信号相邻码元之间的相位不一定连续[7]。本文采用数字键控法实现 2FSK 调制, 其原理框图如图 4 所示。

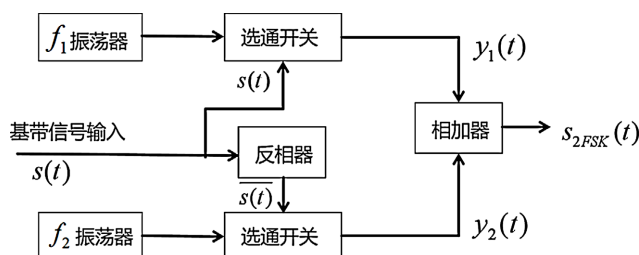


Figure 4. 2FSK signal modulation principle block diagram
图 4. 2FSK 信号调制原理框图

二进制频移键控调制传递信号依靠的是两个独立的不同频率的载波, 频率 f_1 表示二进制符号“1”, 频率 f_2 表示二进制符号“0”, 调制器根据输入二进制数据序列的每一位, 来切换(键控)输出的载波频率, 然后进行相加, 使得输出信号在频率 f_1 和 f_2 之间变化。一个 2FSK 可以看做是两个不同载频的 2ASK 信号之和, 其数学表达式为:

$$s_{2FSK}(t) = y_1(t) + y_2(t) = \begin{cases} A \cdot \cos(f_1 t + \phi_n), & \text{发送“1”时} \\ A \cdot \cos(f_2 t + \theta_n), & \text{发送“0”时} \end{cases} \quad (1)$$

式中 A 为幅度常数, ϕ_n 和 θ_n 为初始相位。

2FSK 信号的解调是调制的逆过程, 解调方法有相干解调和非相干解调。相干解调是利用信号的载波频率和相位信息进行解调, 关键在于接收端必须生成一个与发送端同频同相的本地载波信号[8], 以确保乘法运算后能有效提取基带信息, 设备较复杂。非相干解调不使用乘法器, 接收端不需要与发送端完全同步, 结构相对简单。本文采用非相干解调的过零检测法。通过检测调频波的过零点数得到载波频率的差异, 频率高则过零点数目多, 频率低则过零点数目少。电路原理图和各点波形如图 5 所示。

在 2FSK 调制过程中, 其信号首先会经历放大与限幅处理, 进而生成矩形脉冲序列。随后, 通过微分运算以及全波整流操作, 能够得到一系列与频率变化紧密关联的尖脉冲, 这些尖脉冲实际上对应着调频波的过零点。接着, 借助宽脉冲发生器的作用, 将上述尖脉冲转换为具有特定宽度的矩形波形。值得注意的是, 此矩形波所包含的直流分量能够反映信号的频率特征——当脉冲分布越密集时, 直流分量相应增大, 意味着输入信号的频率也越高。之后, 利用低通滤波器(LPF)对宽脉冲信号进行处理, 提取其中的直流分量, 从而实现了从频率到幅度的有效转换。最终, 依据直流分量在幅度上的差异, 便可准确还原出原始的数字信号“1”和“0”。

3.2. 系统设计

3.2.1. 系统硬件设计

通信系统硬件结构如图 6 所示, 总体由两部分组成: 铅鱼通信模块和地面通信模块。两者通过钢缆

和水体构成通信回路。

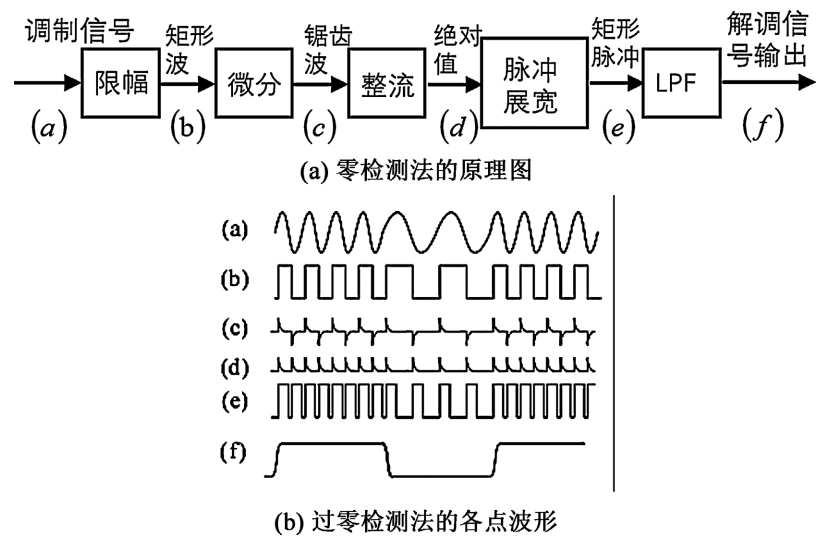


Figure 5. Schematic diagram (a) and waveforms at various points (b) of 2FSK non-coherent demodulation using zero-crossing detection

图 5. 过零检测法的 2FSK 非相干解调的原理图(a)和各点波形(b)

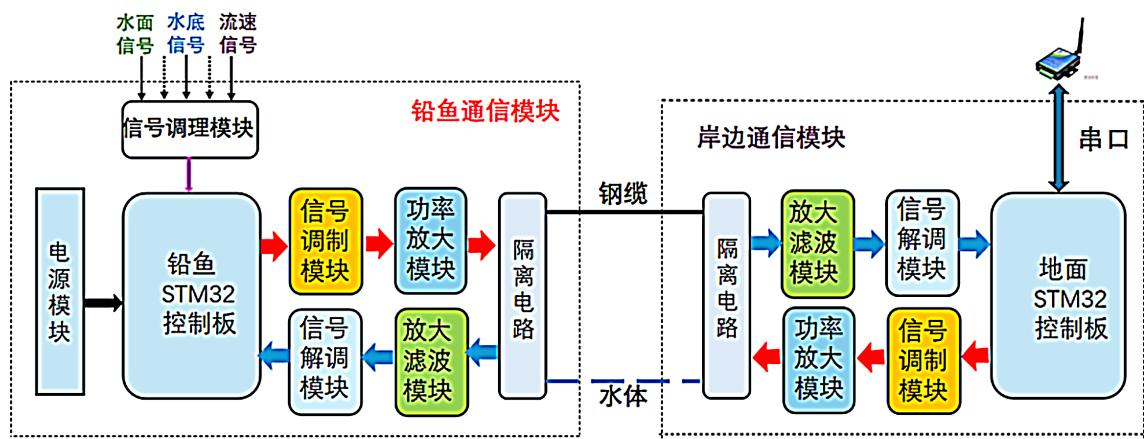


Figure 6. Communication system hardware structure diagram

图 6. 通信系统硬件结构框图

铅鱼通信模块发送信息时, 先将采集到的水面信号、水底信号以及流速信号通过铅鱼内部的 STM32 控制板进行处理, 然后编码成相应的数据帧, 再通过信号调制模块变成调制信号, 并经过功率放大模块进行放大, 最后通过钢缆和水体将信息发送出去。铅鱼通信模块接收信息时, 先将钢缆和水体中的电信号进行滤波放大处理, 然后送入信号解调模块进行信息提取, 得到地面控制命令最后交由控制板处理。

地面接收数据时, 地面 STM32 控制板先将钢缆和水体中的电信号进行滤波放大处理, 然后送入信号解调模块进行信息提取, 得到水下的测量数据后, 通过与计算机相连的串口, 将数据传输给计算机, 由计算机软件进行处理。地面系统发送控制命令时, 计算机先通过串口将命令发给地面 STM32 控制板, 再通过信号调制模块将命令调制成载波信号, 并经过功率放大模块进行放大, 最后通过钢缆和水体将命令发送出去。

水下铅鱼通信模块和地面通信模块相互配合完成对铅鱼水面、水底状态的检测、水流速度的测量、

以及控制工作。

3.2.2. 系统软件设计

通信系统软件内容包括铅鱼和地面控制板单片机对数据处理的程序, 如累加计数、地面 PC 端上位机对铅鱼移动位置过程中的控制系统、经过单片机处理后的数据显示以及数据存储等。最重要的是信号传输中信号发生器和信号接收器的部分, 软件流程如图 7 所示。

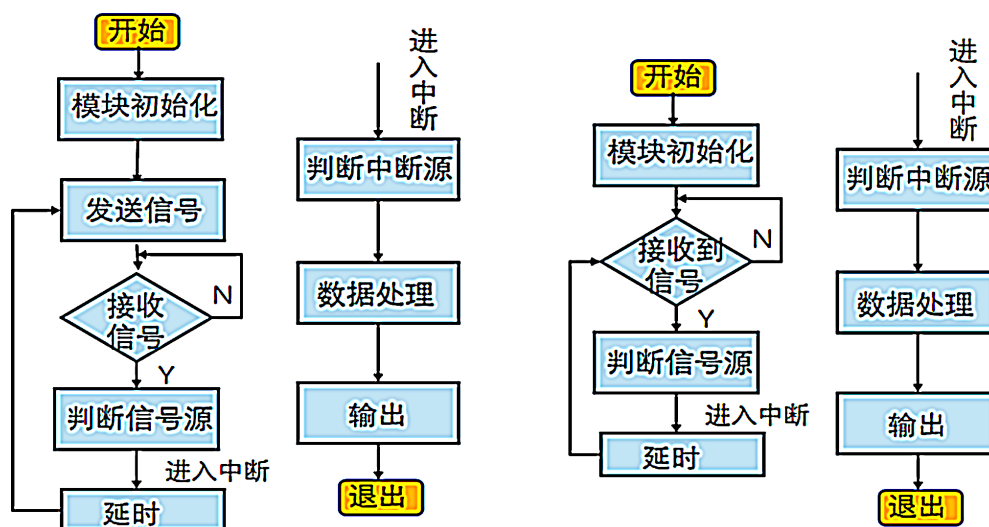


Figure 7. Software flow chart

图 7. 软件流程框图

信号发生器: 系统经过初始化之后, 循环等待传感器信号, 当收到信号后首先判断属于什么信号, 比如水面信号、水底信号或者测流速信号等。之后进入中断服务程序, 开始计数, 直到结束信号的到来或者完成了规定的时间, 而后退出返回主程序。最后主程序将中断子程序统计的结果进行调制后发送。例如测频法: 当主程序检测到开始测流速的信号时, 进入中断子程序启动定时器和转速仪的圈数计数器, 当经过规定时间后停止计数并返回, 将结果反馈给主程序。主程序将此数据调制为二进制数字调制信号后发送。

信号接收器: 系统初始化之后等待数据的传入, 收到调制信号后首先进行解调还原, 然后进行快速傅里叶变换(FFT)。FFT 是 DFT 的一种快速算法[5], 离散傅氏变换(DFT)的目的是把信号由时域变换到频域, 进行初步的频谱分析后将数据上传至上位机或者云端。

3.3. 系统测试

本系统在测试时电源采用 24 V 移动电源, 测试场地多变, 便于携带。铅鱼和接收端的控制核心采用 STM32F407VET6, 该单片机是基于 ARM Cortex-M4 32 位 RISC 架构, 主频高达 168 MHz, 集成多个串行协议接口, 包括 4 个 USART、3 个 SPI、2 个 I²C、1 个 CAN 总线及以太网 MAC 控制器(支持 MII/RMII), 可灵活对接传感器、显示屏以及其他设备之间的通讯。

信号调制和解调采用以 Analog Devices 公司的 AD5700 芯片作为核心器件, 构建的符合 HART 协议标准的二进制频移键控调制解调模块。该芯片通过内置高精度振荡器生成稳定的载波基准信号, 支持 1.2 kHz 与 2.2 kHz 双频率输出以分别表征逻辑“1”和“0”, 实现了数字基带信号到模拟频带信号的高效转换。其集成的带通滤波单元有效抑制谐波干扰, 确保频谱纯度。实验表明, 基于 AD5700 搭建的通信链

路可稳定实现 $\pm 0.1\%$ 的频率精度误差, 且通过主控 STM32 的 UART 接口无缝衔接, 保证可靠性。

功率放大模块电路如图 8 所示, 采用以 LM358 为核心的负反馈放大电路与 OTL 功率放大电路相结合的方式。OTL 电路是单电源供电, 相较于两路电源供电的 OCL 电路来说更简便; 采用乙类推挽工作方式, 通过 NPN 与 PNP 晶体管组成互补对管, 分别负责正负半周期的信号放大, 每个管子仅在半个周期内导通, 确保正负半周波形高度对称, 减少谐波干扰, 而且还大幅降低了静态功耗; 传统电路需要输出变压器, 因其铁芯磁滞、漏感等问题, 易产生相位偏移和波形失真, 而 OTL 直接耦合的设计彻底消除了这一弊端。

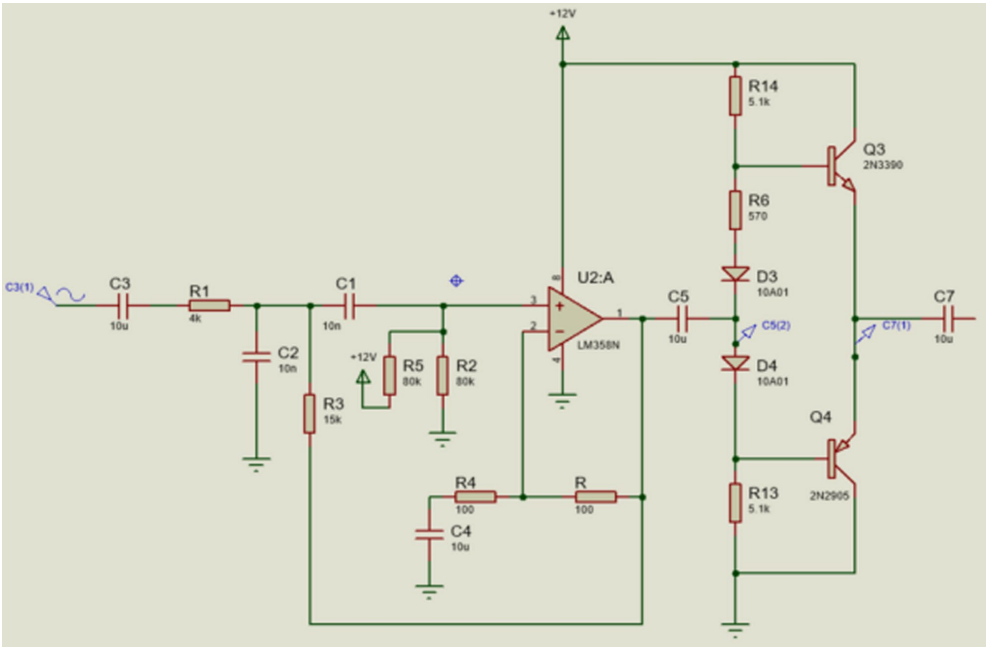


Figure 8. Schematic diagram of filtering and power amplifier module circuit
图 8. 滤波以及功率放大模块电路原理图

隔离模块采用 1:1 隔离音频耦合信号变压器, 通过物理分离初级和次级绕组, 消除不同设备间的地电位差异, 次级不直接接地, 任意一根线都与大地无电位差, 即使接触单根导线也不会形成电流回路, 提升了操作安全性; 仅允许交流信号通过, 阻断直流偏置, 防止其影响信号的传输; 铁芯材料的非线性特性可缓冲瞬态电压尖峰, 保护后端元器件免受突波损坏。电路板实物图如图 9。



Figure 9. Actual picture of the circuit board
图 9. 电路板实物图

为验证其可行性，在荆州藕池水文站对 100 米、150 米、200 米距离分别进行测试(图 10)，效果均良好，接收端能够完整收到发送端发出的测试信息。证明了“无线”水体传输回路模型以及频移键控调制解调的可行性。



Figure 10. Field test
图 10. 现场测试

4. 结语

水文缆道的水体回路“无线”传输系统，其水下信号通信方式有多种，综合分析对比如表 2。

Table 2. Comparison of communication methods

表 2. 通信方式对比

通信方式	优缺点
有线传输	传输稳定可靠，但是成本较高，测量时架设较为复杂。
交流音频信号	较强的抗干扰能力，但是多信号传输时带宽需求较大。
数据编码调制信号	高效率利用频带资源，但是软件处理复杂度高。

本文提出采用数据编码调制中的频移键控(2FSK)方式，将不同信号编成特定的 0 和 1 的组合，系统只需传输两个分别代表“0”和“1”的频率即可，充分利用了频带资源，实现半双工通信。经过各个距离的试验，信号都能够稳定地传输，证明了 2FSK 信号在水下传输的可行性和可靠性，为水文通讯的发展提供了一定的参考。

参考文献

- [1] 李盛洪, 金建辉, 汪洋. 基于水体导电特性的电流信号传输研究[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2023, 39(5): 20-29.
- [2] 戴建国. 水文缆道信号传输的研究[J]. 水文, 2001, 21(4): 22-25.
- [3] 刘泽文, 韩友平. 水文缆道的信号传输研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(3): 5-7.
- [4] 彭丽, 刘鹏翼. 水文流量测验设备转子式流速仪数字信号通讯研究[J]. 湖南水利水电, 2022(1): 56-58.
- [5] 肖虎程, 余德华, 章烈屏. 基于 DSP 的水文缆道信号传输技术开发应用[J]. 人民长江, 2008(20): 47-49.
- [6] 李盛洪, 金建辉. 水文缆道信号高可靠性传输系统[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 8-13, 22.
- [7] 尚丽. 2FSK 信号调制与非相干解调的仿真设计与分析[J]. 苏州市职业大学学报, 2022, 33(1): 5-11.
- [8] 杨钰莹, 厉夫兵, 孙郑平. 2FSK 水下通信仿真与硬件实现[J]. 现代信息科技, 2022, 6(5): 71-75.