

水下磁感应无线通信模块设计

朱景波, 高天德, 张博强

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘要: 为了解决海洋观测系统中传感器节点与主机之间的无缆信息传输问题, 设计了一种基于磁场耦合的低功耗水下半双工无线通信模块; 通过线圈之间的电磁感应进行信息传输, 采用二进制频移键控 (BFSK, binary frequency shift keying) 调制方式对基带信号进行调制; 选用超低功耗单片机 MSP430F5338 作为主控单元; 通过内部定时器的输出模块产生调制载波, 在外部中断中进行频率切换, 实现信号调制; 采用专用解调芯片 XR2211 实现信号解调; 模块由通信总线上的信号唤醒, 设计了一种通过软件检测载波信号的方法, 降低误触发概率; 实验结果表明, 模块在水下间隔 2 米时, 通信成功率达到 100%; 该模块实现方案简单, 成本和功耗较低, 满足海洋观测系统中的应用需求。

关键词: 水下无线通信; 磁感应; 海洋观测系统; 频移键控; 调制解调; MSP430; 频率检测

Design of Underwater Magnetic Induction Wireless Communication Module

Zhu Jingbo, Gao Tiande, Zhang Boqiang

(College of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to solve the problem of cableless information transmission between the sensor node and the host in the ocean observation system, a low-power underwater half-duplex wireless communication module based on magnetic field coupling is designed. Information is transmitted by electromagnetic induction between coils, and the baseband signal is modulated using Binary Frequency Shift Keying (2FSK) modulation. Ultra-low power microcontroller MSP430F5338 is the main control unit. The modulation carrier is generated through the output module of the internal timer, and change the frequency in the external interruption to realize signal modulation; the special demodulation chip XR2211 is used for signal demodulation. The module is woken up by the signal on the communication bus, a method of carrier signal detection through software is designed to reduce false trigger probability. The experimental results show that the communication success rate reaches 100% when the module is 2 meters apart underwater. The implementation of the node is simple, and the cost and power consumption are low. This module meets the application requirements in the ocean observation system due to the simple design, low cost and low power consumption.

Keywords: underwater wireless communication; magnetic induction; ocean observing system; FSK; modulation and demodulation; MSP430; frequency detection

0 引言

海洋中蕴藏着丰富的油气、矿产和生物基因等资源, 而且在维护国家领土安全、预防自然灾害等方面有着举足轻重的地位。随着人类探索范围的不断扩大, 针对海洋的科学研究越来越多。研究人员通常需要在海洋中布放各种传感器网络, 对海洋中的水文信息、环境信息等进行实时监测^[1]。为了提升海洋观测系统的灵活性, 传感器节点通常是独立密封的, 因此水下无线通信技术在海洋观测系统中的应用越来越广泛。

现有的水下无线通信系统通常以声波或者蓝绿激光作为传输媒介。这两种信息载体在水中衰减较少, 传输距离远, 可以实现远距离通信^[2]。在海洋观测系统中, 主机可以移动到传感器附近进行信息收集, 节点之间的通信一般

发生在近场, 声学 and 激光通信方式的优势不能充分发挥。而且声学通信系统一般功耗较大, 且传输速率慢, 信道复杂, 实现算法难度大^[3]; 激光通信系统具有很强的方向性, 水质和浮游生物等因素常常会影响通信效果, 限制了应用范围^[4-5]。针对水下近距离无线通信的应用需求, 设计了一种基于磁场耦合的半双工无线通信模块。信号通过准静态磁场传输, 不存在路径传输损耗和多径效应, 能够实现稳定、高速的无线通信^[6-7]。

1 原理及整体方案

在海洋观测系统中, 传感器节点长期布放于水中进行数据采集。当我们需要某个传感器节点的数据时, 可以下放一个遥控无人潜水器 (ROV, remote operated vehicle) 将数据回读, 进行实时显示或存储。ROV 通过电缆与船上连接, 由船上控制移动到传感器节点附近, 进行无线数据传输。ROV 作为主机, 通过转发上位机指令发起通信, 传感器节点作为从机, 收到指令后进行回复。

ROV 和传感器节点分别装载磁感应无线通信模块, 两者通过线圈在周围空间产生的交变磁场进行信息的传输, 点对点的通信模型如图 1 所示。信号调制到载波频率后,

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-07-18。

基金项目: 国家自然科学基金(51809214)。

作者简介: 朱景波(1996-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事信号与信息处理方向的研究。

高天德(1970-), 男, 四川德阳人, 博士, 副教授, 主要从事信号与信息处理方向的研究。

经过驱动电路加载到线圈两端。由于线圈上的电流是交变的，会在周围空间产生交变的磁场，与此同时，接收端线圈位于交变的磁场中，会产生感应电流和感应电压。接收线圈两端的感应电压经过调理之后解调为基带信号，从而完成信号的传输^[8]。

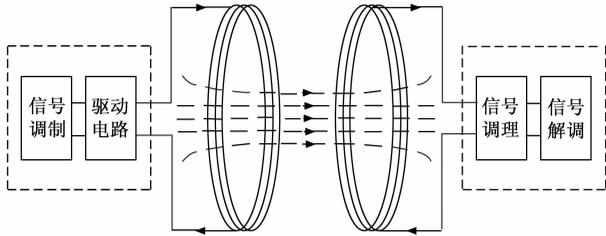


图 1 磁感应点对点通信模型

为了保证通信效果，需要将基带信号搬移到高频信道进行传输。基本的调制方法有三种：幅移键控（ASK, amplitude shift keying）、频移键控（FSK, frequency shift keying）、相移键控（PSK, phase shift keying）。ASK 调制方式抗干扰能力较差，PSK 调制方式抗干扰能力强，但是实现复杂，增加设计难度。FSK 调制方式抗干扰能力相对较强，且实现方式简单^[9]。2FSK 调制方式是用两种载波频率表示传输的信息，可以用计数器分频产生两种载波频率，基带信号电平变化时改变计数周期，从而实现 2FSK 调制。

主机和从机都包含调制发送和接收解调两部分。不同的是主机通过转发上位机指令发起通信，而从机大部分时间处于休眠状态，由主机唤醒并进行回复。本文主要介绍从机通信模块的实现方案，通信模块由主控、调制发送、接收解调和电源管理几个部分构成。我们选用 TI 公司的低功耗系列单片机 MSP430 作为节点的控制中心，通过单片机内部的定时器实现调制功能。接收到的信号经过放大滤波处理，然后通过硬件解调电路转换成串行信号，接入单片机的串口接收端。从机模块在大部分时间处于休眠状态，由通信总线上的有效信号唤醒。调理电路是模块的“看门电路”，迟滞比较器的作用是提高响应速度，过滤噪声干扰。信号经过迟滞比较器变成同频率的方波，接入单片机的比较器输入端，触发单片机中断。单片机程序中进行频率检测判断信号的有效性，当通信总线上出现有效信号时，将从机唤醒。通信模块整体如图 2 所示。

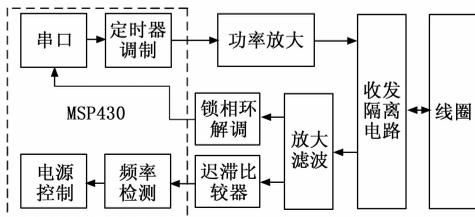


图 2 通信模块整体框图

2 硬件设计

2.1 主控芯片

通信模块的主控芯片选用低功耗微控制器 MSP430F-

5338。该芯片主时钟可达到 20 MHz，工作状态下功耗为 270 μ A/MHz，休眠时功耗仅有 1.1 μ A。MSP430F5338 内部有 4 个 16 位定时器，配有多个捕获寄存器和比较寄存器。定时器的输出模块支持 7 种输出模式，改变计数周期就可以改变输出信号的频率，满足信号调制的应用需求。该芯片集成两个通用串行通信接口控制器，可以用于串行信号的发送和接收。串行信号高低电平变化时，载波频率要随之切换。我们可以通过外部中断实现频率控制，将串口发送信号接入外部中断输入引脚，当信号发生高低电平变化时，会触发上升沿或下降沿中断，这时我们修改定时器的计数值，改变输出频率。用外部中断控制频率变化，可以省去复杂的定时机制，同时保证调制信号的码元宽度。单片机最小系统如图 3 所示。

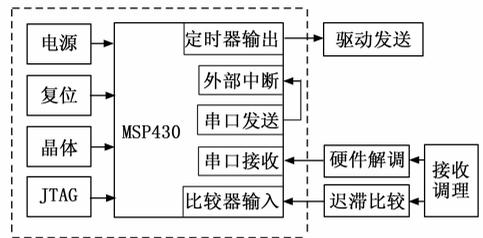


图 3 MSP430F5338 最小系统框图

2.2 接收调理电路

调理电路的作用是将线圈两端接入的微弱电压信号放大，同时抑制带外信号，提高信噪比。调理电路的频率特性为带通滤波器，通带内有一定的放大倍数，且具有低噪声、高输入阻抗的特点。我们采用前置放大、高通滤波、低通滤波的电路结构实现信号调理。由于调理电路需要持续工作，因此对功耗有严格的要求。我们选用 TI 公司的低功耗运算放大器 TLV9002，该芯片为双通道运算放大器，每通道静态功耗仅有 60 μ A。该芯片噪声较低且价格低廉，适用于对成本敏感的设计。

前置放大电路要设置适当的增益，以充分利用运放的增益带宽积，起到抑制带外噪声的目的。同相放大电路具有较高的输入阻抗，电路结构如图 4 所示。

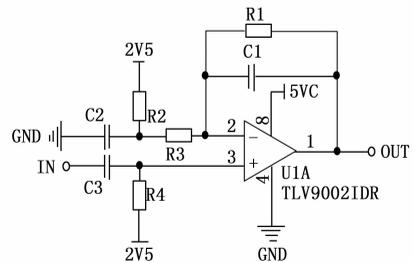


图 4 前置放大电路

信号通过交流耦合方式接入电路，调节 R_1 、 R_3 的阻值可以设置增益。我们在反馈电阻两端并联电容 C_1 来限制电路的带宽，抑制宽带噪声，截止频率按下式计算：

$$f_c = \frac{1}{(2\pi R_1 C_1)} \quad (1)$$

其中: f_c 表示图 4 中 RC 网络的截止频率。

滤波电路包括高通滤波和低通滤波两部分。为了保证频率响应的带内平坦度, 我们选用巴特沃斯滤波器结构^[10]。二阶巴特沃斯滤波器可以实现每倍频程 12 dB 的衰减, 电路结构采用反相输入单放大器双二次节型 (Neg SAB), 通过单个运放即可实现二阶滤波器结构, 简化电路设计。滤波器电路如图 5 所示。

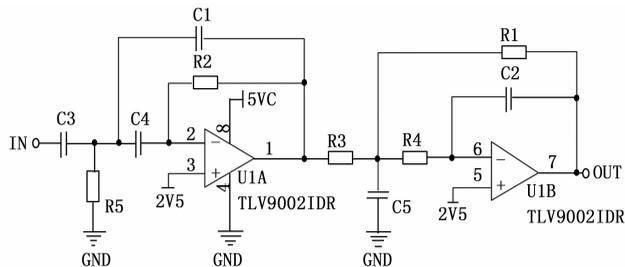


图 5 滤波电路

2.3 解调电路

FSK 解调可以通过软件和硬件两种方式实现。软件解调方式功耗较低, 但是需要生成同频同相的本地载波, 实现起来较为复杂。硬件解调方式一般通过锁相环电路, 实现方式简单且误码率极低, 缺点是电路功耗较大, 需要单独关断。

我们采用硬件解调器 XR2211 实现信号解调。XR2211 是一个专门为数字通信设计的单片锁相环系统, 频率范围 0.01 Hz~300 kHz。模拟输入电压的动态范围从 10 mV~3 V, 解调信号开漏输出, 兼容多种电平标准。XR2211 只需要设置几个阻容就可以完成解调功能, 电路原理如图 6 所示。芯片采用 5 V 电源供电, 由负载开关 tps22860 控制电源通断。调制信号从 2 脚交流耦合输入, 芯片内部将信号偏置到 VCC/2。解调信号从 7 脚输出, 通过 5.1 K 电阻上拉到 3.3 V, 与单片机的 IO 电平兼容。调节 R1 和 C1 改变内部振荡器的频率, 使其等于两个载波频率的中心频率, 通过 R4 设置合理的带宽, 即可完成解调器配置。

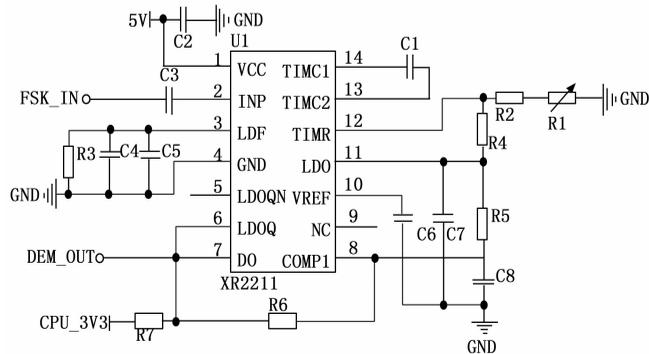


图 6 XR2211 电路原理图

2.4 电源设计

从机通信模块应用于密封的水下系统, 只能采用电池供电, 为了延长使用时间, 我们需要对模块的供电电路进行优化设计。通信模块的电源需求如表 1 所示。

表 1 通信模块电源需求

电路模块	供电电压/V	最大电流/mA	工作模式
主控	+3.3	20	连续
接收调理	+5	10	连续
FSK 解调	+5	10	间歇
信号发送	+9	100	间歇

电路模块按照工作模式分为两种。对于间歇工作的电路模块, 供电电路要独立分开, 或串接负载开关, 可以通过单片机控制, 分时关断其电源。对于持续工作的电路模块, 要选择合适的供电方案, 降低电源自身的耗散功率。常用的电源芯片分为开关稳压电源和线性稳压电源。开关电源效率很高, 但是噪声较大; 线性电源噪声低, 但是自身消耗功率较大。主控和信号发送电路是数字电路, 可以用开关电源供电; 接收调理和解调电路是模拟电路, 需要线性电源二次稳压以降低噪声^[11]。

对于开关稳压电源, 我们要选用低静态电流、高效率的芯片。由于电流需求较小, 最大电流只有 10 mA, 我们选用 ADI 公司的开关电源芯片 LT3990。该芯片最大可以输出 350 mA 电流, 输入电压可以达到 62 V。该芯片在轻载时也可以达到较高的效率, 输出 10 mA 电流时, 效率达到 70% 左右, 远高于其他电源芯片。线性稳压电源的效率取决于输入和输出的电压差, 在芯片选型时, 除了要满足噪声要求, 还要选择低压差的芯片。我们选用 TI 公司的线性稳压芯片 TPS7A4701, 该芯片在输出 1A 电流时, 压降仅有 307 mV, 宽带噪声仅 4.2 μV_{RMS} , 适用于低功耗模拟电路的供电。通信模块的供电方案如图 7 所示, 输入电压 12~48 V, 主控和信号发送电路的电压由两片 LT3990 分别产生, 调理电路的电源先由 LT3990 降压到 5.5 V, 然后再用 TPS7A4701 稳压到 5 V, 解调电路与调理电路共用 5 V 电源, 通过负载开关 TPS22860 控制通断。

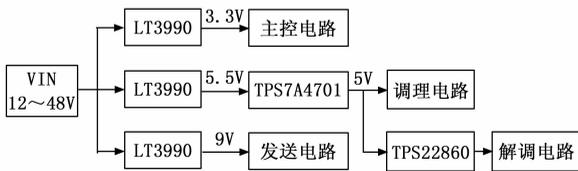


图 7 供电方案

3 软件设计

模块之间的通信是半双工的, 通信由主机发起, 从机回复。每个从机有一个固定的序列号, 主机根据序列号在通信总线上发起广播, 从机收到广播后校验序列号, 如果与自己的序列号相同则在总线上发出回复信息。主从之间的通讯时序如图 8 所示。主机下发命令都是固定长度, 包含帧头、从机序列号、询问内容编码、校验和等信息; 从机收到指令后, 延迟固定时间 t_d 进行回复, 包含帧头、帧长度、本机序列号、询问内容回应、校验和等信息。

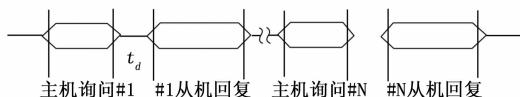


图 8 主从模块通讯时序图

主机发送的命令由上位机下发，通信模块起到信号转发的作用。主机收到上位机的命令，将指令调制发出，收到从机回复后，将信息转发给上位机。从机通信模块大部分时间处于休眠状态，由通信总线上的信号唤醒。从机模块唤醒后，打开解调电路和串口，开始接收命令。命令接收完毕后，进行指令解析和回复信息帧组装，然后延迟固定时间将信号调制发出。为了避免从机通信模块被错误触发，我们要对通信总线上的信号进行频率判断。软件设计的关键部分在于信号调制和频率检测的实现。

3.1 FSK 调制

为了区分主机信号和从机信号，需要将主机和从机的载波频率区分开。主机下发的信号称为下行信号，从机回复的信号称为上行信号，其载波频率如表 2 所示。

表 2 通信载波频率

频率/Hz	高电平	低电平
下行信号	49 400	54 800
上行信号	49 152	51 736

我们使用单片机内部的定时器 TA0 产生载波信号。TA0 是一个 16 位定时器，带有 7 个可配置的比较/捕获寄存器 TA0CCR_x，且每个比较/捕获模块都带有输出单元。我们把定时器的工作模式配置为递增，输出模式配置为翻转，即计数器从 0 增加到 TA0CCR_x 的值，并将输出电平翻转，然后计数器清零，重复上述过程。我们选用 TA0.0 引脚输出调制信号，上述配置完成后，只需改变 TA0CCR0 的值，即可改变输出频率。假设定时器输入时钟频率为 f_{TACLK} ，我们要输出的频率为 f_{out} ，则比较寄存器 TA0CCR0 应该配置为：

$$TA0CCR0 = \frac{f_{TACLK}}{(2 * f_{out})} \quad (2)$$

以上行信号为例，定时器输入时钟频率为 16 MHz，发送高电平载波时，TA0CCR0 设置为 163；发送低电平载波时，TA0CCR0 设置为 155。待调制的串行信号接入外部中断输入引脚，在外部中断服务函数中进行频率切换的控制。信号调制的软件流程如图 9 所示。在调制串行信号之前，我们首先发送一段表示高电平的载波，并将外部中断的触发模式设置为下降沿。串口输出端在空闲状态下为高电平，当串行信号开始发送时，会产生一个下降沿中断，我们在中断服务函数中改变 TA0CCR0 的值，开始发送低电平；同时将中断触发条件改为上升沿，等待下一次外部中断。

3.2 频率检测

从机通信模块进入休眠模式后，等待通信线上的信号唤醒。通信总线在空闲状态下为低电平，有信号出现时，

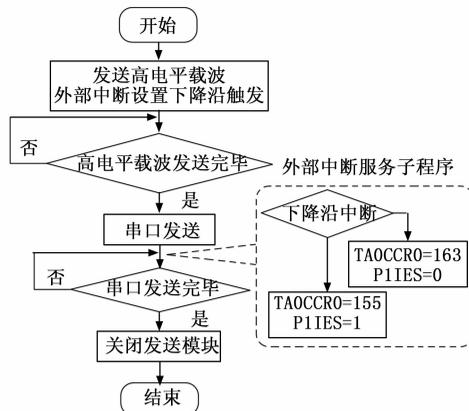


图 9 信号调制流程图

迟滞比较器输出高脉冲，触发单片机产生比较器中断。在理想情况下，我们可以在比较器中断里面唤醒模块，开始接收和回复指令。但是在实际应用时，通信总线上有很多干扰信号，导致模块误触发概率增加。通信模块被唤醒之后，需要给解调电路上电，并打开串口接收，经过串口接收超时，重新进入休眠状态。误触发不仅会导致功耗增大，还可能在超时过程中错过真正的信号。为了避免误触发，要选择一个更加严格的唤醒条件。

主机发送信号时总是以一段高电平载波作为起始，可以通过这段标志性信号来唤醒从机通信模块。起始信号与噪声干扰都会触发比较器中断，不同之处在于起始信号的频率是稳定的，且信号是连续的。当起始信号出现时，会以固定频率连续触发比较器中断，且中断频率与信号频率相同。通过定时器计算比较器中断产生的频率，当比较器中断以某个频率连续产生 N 次时，即可认为起始信号出现。定时器工作在连续模式，每次进入比较器中断时，读取定时器的计数值 t_{new} ，与上一次的计数值 t_{old} 相减，得到一个时间差 Δt ，这个时间差即为信号的周期。我们设置一个目标频率检测范围 $[f_{low}, f_{up}]$ ，则时间差应该满足：

$$\frac{1}{f_{up}} < \Delta t < \frac{1}{f_{low}} \quad (3)$$

具体实现流程如图 10 所示。通信模块进入休眠模式之前打开定时器，允许比较器中断。当接收信号超过迟滞比较器的上门限时，迟滞比较器输出高电平，触发单片机中断。在比较器中断服务函数中读取定时器的计数值，与上一次的计数值相减，得到两次中断的时间差。根据目标信号的周期设置一个时间范围，如果时间差满足要求，则将脉冲计数值加 1，否则将脉冲计数值清零。脉冲计数值增加到 N 时，说明满足频率范围的信号连续出现了 N 次，即起始信号出现。此时打开解调电路和串口接收，开始接收数据。

4 试验与分析

为了验证磁感应无线通信模块的性能，对主机和从机之间的通信进行测试。两个通信节点的线圈放置于水中，间隔一定距离。主机节点通过 RS232 接口与上位机连接，通过串口调试助手发送命令；从机节点的序列号为 7002，

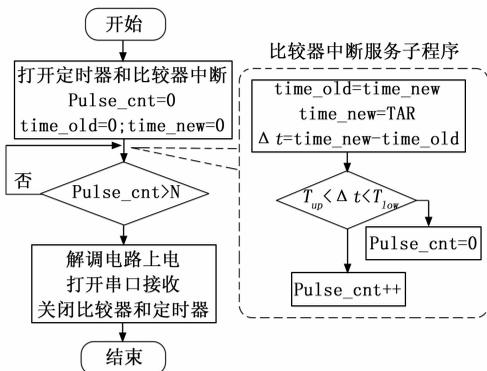


图 10 频率检测流程图

收到主机指令后进行回复。

上位机发送指令查询序列号为 7002 的从机是否在线。发送指令为 FC 6C 1B 5A 55, 其中 FC 是信息帧头, 1B 5A 是 7002 的 16 进制码。从机收到后, 回复 FC 1B 5A 55 CA, 表示本机在线, 其中 CA 是校验和。用示波器测量通信线上的信号, 结果如图 11 所示, 图中由上到下的 3 个通道分别表示从机解调信号、主机线圈两端信号和主机解调信号。

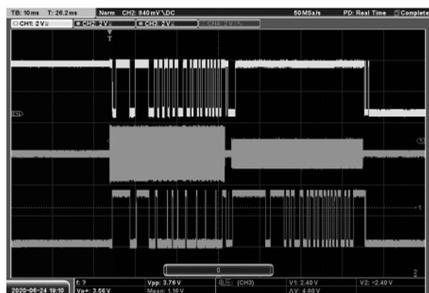


图 11 示波器测量通信信号

上位机通过串口调试助手连续发送询问命令, 通信结果如图 12 所示。

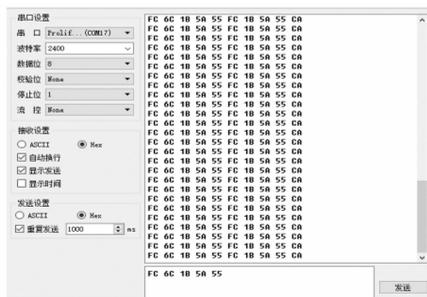


图 12 串口调试助手收发指令

改变线圈之间的距离, 进行长时间的测试, 统计不同距离时节点的通信成功率, 结果如表 3 所示。

由表 3 结果可以看出, 当线圈间距 2 m 时, 通信成功率仍可达到 100%; 线圈间隔 2.14 m 以上时, 通信效果急剧下降。由于磁场是静态场, 不具有传播性, 当线圈间距较远时, 接收端信号不能超过迟滞比较器的门限, 从机通信模块没有被唤醒, 因此无法正常通信。磁耦合无线通信模

表 3 不同间距时的通信成功率

间距/m	通信次数	成功次数	成功率/%
1.0	1 000	1000	100
1.5	1 000	1000	100
2.14	1 000	989	98.9
2.2	1 000	0	0
2.5	1 000	0	0

块主要应用于水下近场通信, 解决水下无缆密封系统的信息传输问题, 满足应用要求。水下磁感应通信不存在多径效应干扰, 不需要复杂的算法, 实现起来简单, 且通信效果良好^[12]。

5 结束语

为了解决海洋观测系统中无缆信息传输的问题, 设计了一种基于磁场耦合的低功耗无线通信模块。通过线圈耦合交变磁场进行信息传递, 实现半双工通信。主机通信模块通过转发上位机指令发起通信, 从机通信模块大部分时间处于休眠模式, 由通信信号唤醒。采用超低功耗单片机 MSP430F5338 作为主控芯片, 通过软件方式实现通信总线上的载波信号频率检测。通过单片机内部定时器和专用锁相环电路实现 2FSK 调制和解调, 提高信号的抗干扰能力。结果表明, 磁感应无线通信模块设计简单, 成本和功耗较低。在水下间距 2 m 以内时, 通信成功率可以达到 100%, 在海洋观测系统中有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙晓霞, 孙 松. 开展近海生态系统长期观测引领海洋生态系统健康研究 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34 (12): 1458-1466.
- [2] 王毅凡, 周 密, 宋志慧. 水下无线通信技术发展研究 [J]. 通信技术, 2014, 47 (6): 589-594.
- [3] 朱 敏, 武岩波. 水声通信技术进展 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34 (3): 289-296.
- [4] 李宏升, 岳 军, 金久才, 等. 蓝绿激光水下通信技术综述 [J]. 遥测遥控, 2015, 36 (5): 16-22.
- [5] 易丛琴, 周汝雁. 水下无线光通信关键技术应用研究 [J]. 通信技术, 2017, 50 (10): 2202-2205.
- [6] 施文娟, 孙彦景, 李 松, 等. 挑战环境下无线磁感应传感网理论与关键技术 [J]. 工矿自动化, 2016, 42 (6): 20-25.
- [7] 邓 云. 感应耦合数据传输技术及其在海洋领域的应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [8] 杨宏正, 曹年青, 王三胜, 等. 线圈磁耦合模型仿真及其应用 [J]. 测试技术学报, 2016, 30 (6): 471-477.
- [9] 杨法红, 马志伟, 徐信宏. 基于单片机的远程开关机模块的设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2016, 39 (1): 59-61.
- [10] 任勇峰, 尉易庆, 贾兴中. 一种微弱电荷信号的调理电路设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2019 (3): 86-90.
- [11] 刘义海, 张效民, 赵延安, 等. 一种低功耗水下目标识别系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (2): 470-473.
- [12] 孙彦景, 徐 胜, 施文娟, 等. 无线地下磁感应通信系统研究与实现 [J]. 传感技术学报, 2017, 30 (6): 904-908.