

文章编号:1671-251X(2019)06-0016-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17425

水下环境安全监测无线磁感应通信技术研究

李松¹, 潘东跃¹, 孙彦景^{1,2}, 徐华³, 王斌²

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054;

3. 盐城师范学院 新能源与电子工程学院, 江苏 盐城 224007)



扫码移动阅读

摘要:针对复杂水下环境中安全监测的应用需求,采用无线磁感应通信技术作为信息传输技术;介绍了水下无线磁感应通信原理,阐述了基于FSK调制方式的水下无线磁感应通信平台设计方案,并在模拟水下环境中进行了通信试验。试验结果表明:水下无线磁感应通信平台能够实现在水下环境中的无线信息传输;采用单向天线的水下无线磁感应通信平台在接收天线位置、角度变化情况下会出现通信中断现象,而采用全向天线的水下无线磁感应通信平台在接收天线位置、角度变化过程中能正常通信,提高了通信可靠性。

关键词:水下环境安全监测;水下无线通信;无线磁感应通信;单向天线;全向天线;FSK调制
中图分类号:TD655 文献标志码:A

Research on wireless magnetic induction communication technology for underwater environment safety monitoring

LI Song¹, PAN Dongyue¹, SUN Yanjing^{1,2}, XU Hua³, WANG Bin²

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. School of New Energy and Electrical Engineering, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, China)

Abstract: For application requirements of safety monitoring in complex underwater environment, wireless magnetic induction communication technology was adopted to be information transmission technology. Principle of underwater wireless magnetic induction communication was introduced. Design scheme of an underwater wireless magnetic induction communication platform based on FSK modulation was expounded and communication test was taken out by use of the platform in simulated underwater environment. The test results show that the platform can realize wireless information transmission in underwater environment. The platform using unidirectional antenna will have communication interruption under the condition of changing position or angle of receiving antenna. While the platform using omnidirectional antenna can communicate normally in process of changing position or angle of receiving antenna, which improves communication reliability.

Key words: underwater environment safety monitoring; underwater wireless communication; wireless magnetic induction communication; unidirectional antenna; omnidirectional antenna; FSK modulation

收稿日期:2019-04-11;修回日期:2019-05-18;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61771417,51804304,51734009);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801403);徐州市科技项目(KC18105,KC18068)。

作者简介:李松(1985—),男,山东济宁人,副教授,博士,主要从事矿山通信与组网方面的科研和教学工作,E-mail:sdlisong85@163.com。

引用格式:李松,潘东跃,孙彦景,等.水下环境安全监测无线磁感应通信技术研究[J].工矿自动化,2019,45(6):16-20.

LI Song, PAN Dongyue, SUN Yanjing, et al. Research on wireless magnetic induction communication technology for underwater environment safety monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(6): 16-20.

0 引言

面对陆地矿产资源日益匮乏的情况,人们逐渐将目光转向广阔的海洋。占据地球 2/3 表面积的海洋蕴含丰富的矿产资源,因此对于海洋矿产资源的勘探与开采成为解决当前资源匮乏问题的有效途径之一^[1]。在进行海洋资源开采的同时,需要对周围环境进行监测,实时有效地获取周围环境信息。作为水下安全监测的支撑技术,水下无线通信技术日益成为学者们的研究热点。传统的水下无线通信技术主要有水下电磁波通信、水声通信和水下可见光通信。高频电磁波在水下传播时存在严重衰减,因此在水下环境中只能采用极低频或甚低频频段的电磁波,导致水下电磁波通信系统需要大尺寸天线,无法满足水下安全监测的应用需求^[2]。水声通信采用声波作为信号载体,声波在水下的传播速度约为 1 500 m/s,因此水声通信的传输时延较大,无法实现信息实时传输;水声通信会受到水底水面反射的影响,造成严重的多径效应,影响通信性能^[3];水下环境复杂,周围环境噪声严重,直接降低水声信号的接收信噪比。水下可见光通信通常采用波长 450~550 nm 的蓝绿光束,但是在水质浑浊的情况下,水中粒子会对光波造成散射及折射现象,并且水下生物、潜航器等会在光波传输路径上造成视距遮挡现象,发生通信链路中断情况^[4]。

无线磁感应通信作为近年来新兴的无线通信技术,在水下和地下等挑战环境下具有很好的应用前景^[5-8]。无线磁感应通信通过耦合线圈感应出磁场分量作为载体传输信息,且磁场信号比电磁波信号具有更好的水下介质穿透能力。由于影响无线磁感应通信信道状态的主要因素是传输介质的磁导率,而在水下环境中介质的磁导率基本一致,所以无线磁感应通信在水下环境中具有稳定的信道状态^[9]。

文献[10]建立了水下无线磁感应通信模型,分析了无线磁感应通信在水下环境中的传输特性,并与水声通信、水下电磁波通信进行对比分析,结果验证了无线磁感应通信在水下环境中的可行性。文献[11]提出了一种由无线磁感应通信收发端与磁感应中继线圈组成的三维水下通信网络,研究了其拓扑结构,并从数值上分析了三维水下通信网络的信噪比、误码率、带宽等性能。文献[12]针对水下潜航器因位置变化而导致水下无线磁感应通信性能下降的问题,提出了一种三向天线通信模型,研究了其路径损耗、系统容量等。文献[13]分析了水下安全监测网络中单向天线与全向天线无线磁感应通信模型在天线位置与角度变化情况下的路径损耗。

本文采用无线磁感应通信技术作为水下环境安全监测的信息传输技术。首先分析了水下无线磁感应通信的传输原理,然后给出了水下无线磁感应通信平台设计方案,并利用该平台,在模拟水下环境中分别对单向天线与全向天线无线磁感应通信进行测试,研究了天线位置与角度变化对通信性能的影响。

1 水下无线磁感应通信原理

水下无线磁感应通信模型如图 1 所示。采用环形线圈作为收发天线,发射、接收线圈半径分别为 a_t, a_r ,收发线圈之间的距离为 r ,收发端通过线圈产生的磁场进行信息传输。当发射线圈上加载交变电流 I_1 时,线圈周围产生变化的磁场,而此时处于磁场中的接收线圈上会产生相应的感应电流 I_2 ,接收端信号经过相应的解调方法解调出发射端信息。

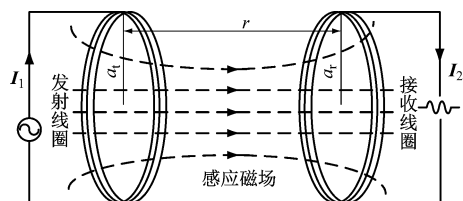


图 1 水下无线磁感应通信模型

Fig. 1 Underwater wireless magnetic induction communication model

水下无线磁感应通信模型的二端口等效电路如图 2 所示。端口 1 电流为 I_1 ,电压为 V_1 ;端口 2 电流为 I_2 ,电压为 V_2 ;发射线圈等效阻抗为 Z_{TX} ,负载阻抗为 Z_L 。二端口网络的 Z 参数^[10]为

$$\begin{cases} Z_{11} = R_{TX} + j\omega L_{TX} \\ Z_{22} = R_{RX} + j\omega L_{RX} \\ Z_{12} = Z_{21} = j\omega M \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_{TX}, R_{RX} 分别为发射、接收线圈导体电阻; ω 为加载在发射线圈上电流的角频率; L_{TX}, L_{RX} 分别为发射、接收线圈的自感; M 为收发线圈之间的互感。

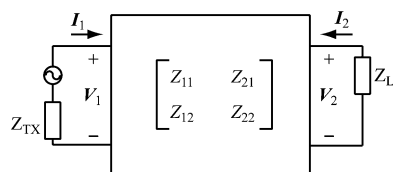


图 2 水下无线磁感应通信模型等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of underwater wireless magnetic induction communication model

可用式(2)的 Z 参数矩阵描述图 2 的二端口网络:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ -Z_L I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可得接收线圈中感应电流:

$$I_2 = \frac{Z_{21} V_1}{Z_{12} Z_{21} - Z_{11} (Z_{22} + Z_L)} \quad (3)$$

当收发线圈处于如图 3 所示位置时,收发线圈之间的互感为

$$M = \frac{\mu \pi N_t N_r a_t^2 a_r^2}{4r^3} [3 \sin \theta_2 \cos \theta_1 \sin \theta_1 \cos (\varphi_2 - \varphi_1) + \cos \theta_2 (2 \cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_1)] \quad (4)$$

式中: μ 为水下介质的磁导率, $\mu = \mu_r \mu_0$, μ_r 为水下介质的相对磁导率, $\mu_r = 1$, μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; N_t, N_r 分别为发射、接收线圈匝数。

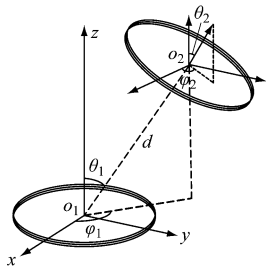


图 3 收发线圈位置

Fig. 3 Position of transmitting and receiving coils

2 水下无线磁感应通信平台设计

水下无线磁感应通信平台主要由信源、信道和信宿 3 个部分组成,如图 4 所示。在信源部分,微处理器将外部传感器采集的信息进行数据编码,通过 FSK 调制方式将微处理器编码后的基带信号进行调制。已调信号通过功率放大器后加载到发射线圈,通过磁场形式将信息发送出去。在信宿部分,接收线圈感应出相应的电信号,通过接收滤波滤除干扰信号后进行放大,然后经过 FSK 解调方式恢复出原始基带信号,完成通信过程。

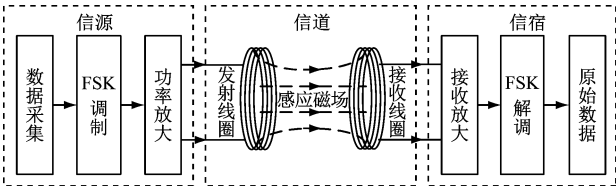


图 4 水下无线磁感应通信平台组成

Fig. 4 Composition of underwater wireless magnetic induction communication platform

2.1 调制发送电路

选用 AD9854 作为调制芯片。AD9854 是一款高度集成的数字合成器,采用先进的 DDS(Direct Digital Synthesizer,直接数字式频率合成器)技术,通过修改其内部寄存器控制频率、幅度、相位等,可以很容易、精确地实现各种调制算法。

基于 AD9854 的调制发送电路如图 5 所示。通过 STM32F107 单片机对 AD9854 进行初始化操作并控制其相关寄存器,控制 AD9854 产生所需信号。STM32F107 的 PC6 引脚与 AD9854 的 FSK 引脚连接,基带信号通过 STM32F107 的 PC6 引脚输入

AD9854,作为控制信号控制 AD9854 输出频率。

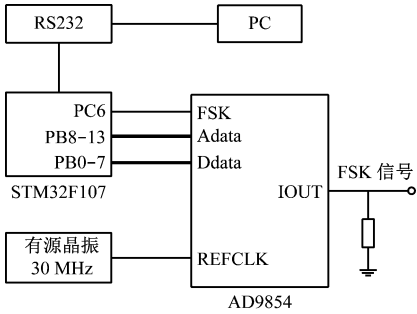


图 5 调制发送电路

Fig. 5 Modulation transmission circuit

AD9854 输出频率为

$$f_{out} = \frac{W_{FT} C_{SYS}}{2^N} \quad (5)$$

式中: W_{FT} 为频率控制字; C_{SYS} 为系统时钟信号; N 为 AD9854 频率寄存器位数。

AD9854 输出的调制信号较弱,无法驱动发射线圈,因此采用 OPA548 运算放大器对调制信号进行放大。

2.2 调制软件

基于 AD9854 的调制软件流程如图 6 所示。首先 STM32F107 通过外部引脚控制方式对 AD9854 进行初始化操作,定义各端口作用:STM32F107 的 PB0—PB7 端口定义为 8 位可编程数据接口,PB8—PB13 端口定义为可编程寄存器的 6 位地址输入接口,PC6 端口定义为基带信号输入端口。然后选择 FSK 工作模式,写入频率控制字 W_{FT1} 和 W_{FT2} 。最后判断 PC6 端口是否有基带信号输出,若没有则结束程序,若有信号输出,当输出为低电平时,调制发送电路输出频率为 f_1 的信号,当输出为高电平时,调制发送电路输出频率为 f_2 的信号。

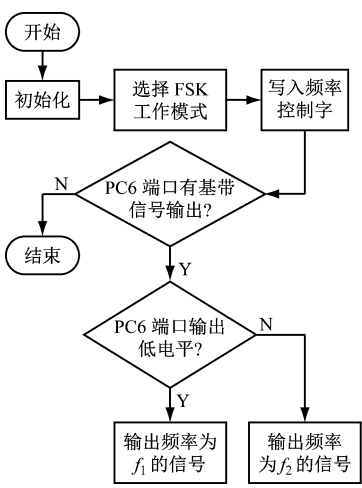


图 6 调制软件流程

Fig. 6 Process of modulation software

2.3 接收解调电路

接收解调电路包括接收放大电路和 FSK 解调

电路,如图 7 所示。接收放大电路为由低噪声三极管组成的两级放大电路,通过选取合适的电阻可设置放大倍数。FSK 解调电路采用 CD4046 锁相环芯片作为解调器件,使用 CD4046 中的相位比较器、压控振荡器与外接滤波器构成基本锁相环路,对 FSK 信号进行频率锁定。滤波器滤除信号中的高频分量,得到发射端原始基带信号。

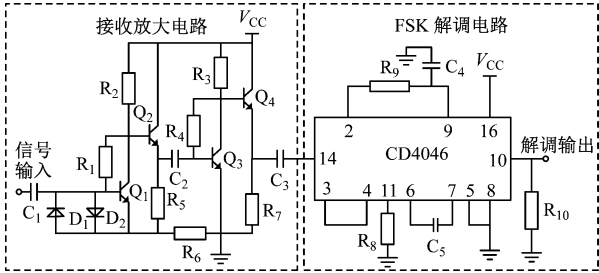


图 7 接收解调电路

Fig. 7 Receiving demodulation circuit

2.4 收发天线

选用由漆包线绕制的环形导体线圈作为水下无线磁感应通信平台的收发天线。收发天线位置、角度变化对采用单向天线的磁感应通信性能影响较大,而全向天线能有效缓解收发天线位置、角度变化对通信造成的影响^[13]。因此,分别制作了单向天线和全向天线。全向天线直径为 15 cm,单向天线直径为 15,20 cm,线圈匝数均为 5。收发天线如图 8 所示。



图 8 收发天线

Fig. 8 Transmitting and receiving antennas

3 通信试验

根据上述方案搭建水下无线磁感应通信平台,如图 9 所示,在模拟水下环境中对其进行测试。首先测试单向天线处于共轴平行状态下的通信性能,结果见表 1。可看出水下无线磁感应通信平台能在水下环境中实现无线信息传输,且当线圈匝数相同时,线圈半径越大,通信距离越远。

然后测试接收天线位置变化对通信性能的影响。设置收发端之间的距离为 50 cm,接收端以发射端为圆心做圆周运动,当旋转 0,45,90°时,对采用单向天线和全向天线的水下无线磁感应通信平台进行测试,结果见表 2。

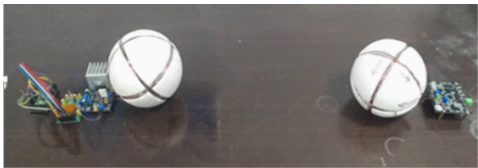


图 9 水下无线磁感应通信平台

Fig. 9 Underwater wireless magnetic induction communication platform

表 1 单向天线磁感应通信测试结果

Table 1 Test results of magnetic induction communication of unidirectional antenna

通信距离/cm	测试结果	
	15 cm 单向天线	20 cm 单向天线
50	成功	成功
60	成功	成功
70	成功	成功
80	失败	成功
90	失败	失败

表 2 接收天线处于不同位置时测试结果

Table 2 Test results when receiving antenna is in different positions

旋转角度/(°)	测试结果	
	15 cm 单向天线	全向天线
0	成功	成功
45	失败	成功
90	失败	成功

最后测试接收天线角度变化对通信性能的影响。收发天线开始处于共轴平行状态,保持发射端位置不变,收发端距离为 50 cm,在接收天线处于不同角度下,分别对采用单向天线和全向天线的水下无线磁感应通信平台进行测试,结果见表 3。

表 3 接收天线处于不同角度时测试结果

Table 3 Test results of receiving antenna at different angles

接收天线角度/(°)	测试结果	
	15 cm 单向天线	全向天线
0	成功	成功
45	失败	成功
90	失败	成功

从表 2、表 3 可看出,对于采用单向天线的水下无线磁感应通信平台,接收天线位置和角度变化会造成通信链路中断,而采用全向天线的平台在接收天线位置和角度变化过程中仍能保持正常通信。

4 结论

(1) 由于水下传输介质具有几乎一致的磁导

率,所以无线磁感应通信在水下环境中具有稳定的信道状态。

(2) 制作的水下无线磁感应通信平台能够实现在水下环境中的无线信息传输。

(3) 试验过程中,在接收天线位置、角度变化情况下,采用单向天线的水下无线磁感应通信平台会出现通信中断现象,而采用全向天线的平台则能保持正常通信,有效提高了通信可靠性。

参考文献(References):

[1] 杨士莪. 研究海洋 开发海洋——海洋环境及海洋资源调查、监测技术概述[J]. 舰船科学技术, 2008, 30(5):17-19.
YANG Shie. Ocean expedition and ocean exploitation-a general review about techniques of ocean inspection and survey[J]. Ship science and technology, 2008, 30 (5):17-19.

[2] HEIDEMANN J, STOJANOVIC M, ZORZI M. Underwater sensor networks: applications, advances and challenges[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370(1958):158-175.

[3] STOJANOVIC M, PREISIG J. Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1):84-89.

[4] SAHU S K, SHANMUGAM P. A theoretical study on the impact of particle scattering on the channel characteristics of underwater optical communication system[J]. Optics Communications, 2018, 408:3-14.

[5] SHARMA A K, YADAV S, DANDU S N, et al. Magnetic induction-based non-conventional media communications:a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(4):926-940.

[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.
SHI Wenjuan, SUN Yanjing, LI Song, et al. Theory and key technologies for wireless magnetic induction sensor network in challenging environment [J].

Industry and Mine Automation, 2016, 42(6):20-25.

[7] 孙彦景,吴天琦,施文娟,等. 无线透地通信理论与关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(9):46-53.
SUN Yanjing, WU Tianqi, SHI Wenjuan, et al. Research on theory and key technologies of wireless through-the-earth communication [J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9):46-53.

[8] 施文娟,王亮,孙彦景,等. 地下磁感应通信天线模型及信号传播特性研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(7): 45-53.
SHI Wenjuan, WANG Liang, SUN Yanjing, et al. Research on antenna model of underground magnetic induction communication and its signal transmission characteristics[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(7):45-53.

[9] AKYILDIZ I F, WANG P, SUN Z. Realizing underwater communication through magnetic induction[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(11):42-48.

[10] DOMINGO M C. Magnetic induction for underwater wireless communication networks [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(6):2929-2939.

[11] GULBAHAR B, AKAN O B. A communication theoretical modeling and analysis of underwater magneto-inductive wireless channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(9):3326-3334.

[12] GUO H, SUN Z, WANG P. Multiple frequency band channel modeling and analysis for magnetic induction communication in practical underwater environments [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8):6619-6632.

[13] 孙彦景,潘东跃,徐华,等. 水下安全监测无线磁感应通信 3D 路径损耗[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3):616-623.
SUN Yanjing, PAN Dongyue, XU Hua, et al. Wireless magnetic induction communication 3D path loss for underwater safety monitoring [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(3): 616-623.