

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416977

BPSK 磁感应通信关键因素及性能分析*

李欣甜¹ 张晓明^{1,2} 张鸽¹

(1. 中北大学电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 为满足复杂海域中 UUV 集群协作通信的需求,提出一种基于 BPSK 的磁感应通信系统。通过建立信道传输模型,分析不同收发模型、海水、载波同步和载波频率对信道传输的影响,结合 MATLAB 仿真与实验进行验证。仿真结果表明,BPSK 调制在复杂信道条件下表现优越;一发三收模型对姿态变化不敏感;相位偏移是涡流效应中的主要因素,载波同步显著降低其影响,最终结果显示误码率降低至 10^{-3} 数量级,能够有效满足 UUV 集群协作通信的需求,验证了该系统在复杂海域条件下的高稳定性和可靠性,最后通过硬件实验进一步验证了该系统的可行性。

关键词: 磁感应通信;UUV 集群;BPSK;载波同步;磁感应线圈;锁相环

中图分类号: TN92 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5

BPSK magnetic induction communication key factors and performance analysis

Li Xintian¹ Zhang Xiaoming^{1,2} Zhang Ge¹

(1. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Testing, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To meet the needs of UUV cluster collaborative communication in complex marine environments, a magnetic induction communication system based on BPSK is proposed. A channel transmission model is established to analyze the effects of different transceiver models, seawater, carrier synchronization, and carrier frequency on channel transmission, combined with MATLAB simulations and experiments for validation. Simulation results show that BPSK modulation performs well under complex channel conditions; the one-to-three receive model is insensitive to attitude changes; phase offset is a major factor in the effects of eddies, and carrier synchronization significantly reduces its impact. Ultimately, the results indicate that the bit error rate decreases to the order of 10^{-3} , effectively meeting the collaborative communication needs of UUV clusters, validating the system's high stability and reliability in complex marine conditions. Finally, hardware experiments further validate the feasibility of the system.

Keywords: magnetic induction communication; UUV cluster; BPSK; carrier synchronization; magnetic induction coil; phase-locked loop

0 引言

自 20 世纪 60 年代水下无人潜航器 (unmanned underwater vehicle, UUV) 问世以来,凭借其无需依赖母船动力、机动性强、覆盖广泛等优势^[1],逐渐成为各国研究重点,并广泛应用于海洋资源勘探^[2]、侦查监视和反潜等领域。随着 UUV 技术的进步,任务难度和复杂性增加,多 UUV 集群协作执行任务成为必然趋势,这对任务规划和路径规划等关键技术提出了新的要求,尤其在复杂海域环境中,短距离、快速、可靠通信技术的实现成为实现协同作

业的关键前提和核心技术。但是,传统无线通信中,声通信受环境噪声和水中传播条件影响大,数据速率低,存在较高延迟;光通信传输距离短,需直接视距,易受水中悬浮物和障碍物干扰;无线电通信在水中传播损耗大,通信距离有限且能耗较高^[3],难以满足水下实时高速通信需求。相比之下,磁感应通信以其信道稳定、装置小型化、成本低等优势受到关注^[4]。磁信号通过交流磁偶极子场产生,电场成分微弱或不存在,这是因为极低频下,电磁线圈天线的辐射电阻极低,磁信号在空气中形成准静态场,在导电介质中扩散,避免了多路径效应的影响,可调制以传输数据,能够穿

收稿日期:2024-09-25

* 基金项目:国家自然科学基金(61873247)项目资助

透水、沉积物和岩石,信号调制解调技术和线圈选择是其中的关键^[5]。

文献[6-8]提出,目前国内外关于 UUV 集群的研究主要集中在航路规划、集群综合控制和目标探测识别这 3 个关键领域,通过优化航路规划确保无人机能够有效避障和节约能源,通过综合控制实现集群的协同运动和任务执行,并通过目标探测识别技术提高集群对环境的感知能力和目标识别打击能力。然而,关于 UUV 协作通信的研究相对较为有限。特别是在深海或浅水复杂环境中,单靠整体控制难以应对突发情况和未知障碍,因此,深入研究 UUV 协作通信技术对提升集群自主性和适应性具有重要意义,优化 UUV 协作通信不仅提升集群的协调性和灵活性,还能通过改进通信技术降低通信延迟和误码率,增强复杂环境中的应对能力,提高任务执行的可靠性和效率。

与调制解调结合的磁感应通信相关研究已取得了一定进展:Hosseini 设计了适用于短距离磁场无线通信的全集成模拟前端和二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)解调器^[9],实现了 32 kbps 的数据速率;Kommangunta 设计了一种适用于磁场通信的低功耗轻量级 BPSK 解调器;文献[10]提出了一种基于二进制偏移载波和 BPSK 调制的多功能信号,简化了接收器设计并提高频谱利用率,实现通信与测量功能快速切换;朱家莹^[11]水下磁感应通信的天线模型及信号合并策略,角度估计准确度在信噪比为 5 dB 时达 96.9%;张嘉辉^[12]分析了水下磁感应通信的信道模型及传输特性;范泽国^[13]仿真了水下磁信号衰减模型;赵东阳等^[14]提出基于磁感应通信的水下链式网络 MAC 协议,仿真结果表明其在传输延时等方面有 10% 左右的优化;颜家儒^[15]建立水下磁通信模型,通过对 BPSK 误码率和信道容量等的计算,验证其相对于电磁波通信的优越性;柴彬彬等^[16]通过频移键控信号海上磁感应通信实验验证了频移键控信号跨界通信可行性;刘宝衡等^[17]构建了基于 BPSK 的波导与协同技术磁感应信道模型有效降低了路径损耗并延长通信距离;熊仁杰^[18]设计的低频正交频分复技术提高了水下磁感应图像传输速率并无误码恢复图像。

目前国内外相关研究主要集中于线圈传输特性分析、调制解调技术开发、整体系统设计与优化、实际应用测试等方面,这些研究在提升传输速率、增强抗干扰能力和提高信号稳定性方面取得了一定进展,但仍存在一些不足和局限:对 BPSK 在水下磁通信中的应用及其性能尚缺乏深入探讨,并未考虑对海水涡流等动态环境因素的影响,这对实际应用中的信号稳定性和传输效率提出了挑战;对 BPSK 调制解调性能的影响分析较为薄弱;UUV 协作通信需要高效可靠的通信模型支持,现有研究在这一方面的模型选择和优化尚未深入展开。

本文将无线磁感应通信线圈与 BPSK 相结合,实现高效、可靠的 UUV 协作通信。BPSK 具有较强的抗干扰能力,在噪声较大的环境中也能保持较高的信号完整性,磁信

号在水中传播时能够较好地穿透水体和障碍物,受环境影响小,适用于复杂的水下环境,二者结合后能够在复杂的噪声和干扰环境下保持通信的可靠性。为验证上述理念的可行性和有效性,首先建立基于 BPSK 水下磁感应通信模型,研究分析该模型下无线通信信道的影响因素,重点包括不同收发模型、不同调制方式、不同频率以及海水等因素,并在仿真环境中进行广泛测试,包括模拟多种实际应用场景,以量化各因素对系统性能的影响。初步仿真结果表明,该方法在多种条件下能够显著提升通信性能,验证了其在实际应用中的有效性和潜在优势。在仿真验证基础上,进一步进行实验验证。

1 通信系统设计与 BPSK 原理解析

从图 1 可以看出,通信系统的基本构成包含信号源、调制模块、信道传输、解调模块以及输出信号评估几个关键部分。信号源负责生成原始信号;调制模块对信号进行调制以适应信道传输的需求;信道传输则代表信号在物理媒介中的传播过程,可能受到各种干扰和衰减;解调模块的作用是将接收到的信号还原为原始信息;最后通过输出信号评估模块对解调后的信号进行质量评估,以确定通信系统的性能和可靠性。后续研究重点分析各个模块的优化策略和对整体系统性能的影响,以提高通信系统的鲁棒性和效率。

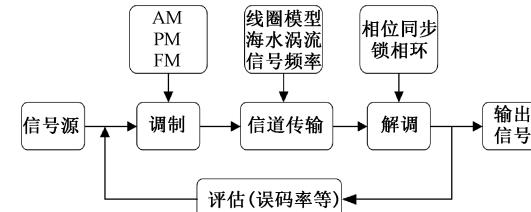


图 1 通信系统流程图

Fig. 1 Flow chart of communication system

从调制模块看,信号的调制与解调方式主要包括调频(frequency modulation, FM)、调相(phase modulation, PM)和调幅(amplitude modulation, AM)。在水下无线磁感应通信中,信号衰减、噪声干扰和带宽限制是主要问题。AM 调制硬件简单,但对幅度噪声和电磁干扰非常敏感,且频谱利用效率较低,难以满足高数据速率传输的需求;FM 调制抗干扰能力强,但频谱效率低,占用带宽大,且电路设计复杂,尤其在水下环境中技术实现困难。相比之下,PM 调制不受幅度噪声影响,抗干扰能力强,能在噪声环境中保持高信号质量,并高效利用水下有限带宽资源,在水下无线磁感应通信中,是最优选择。

与其他 PM 方法相比,BPSK 具有一些独特的优势:具有较高的带宽利用率;对噪声的抵抗能力更强;实现相对简单,易于在硬件和软件中进行调制和解调,尤其适用于需要低复杂度实现和稳定性能的应用场景。

BPSK 信号的时域表达式为:

$$e_{BPSK}(t) = A \cos(\omega_c t + \varphi_n) \quad (1)$$

其中, n 表示第 n 个符号的绝对相位:

$$\varphi_n = \begin{cases} 0, & \text{发送'1'时} \\ \pi, & \text{发送'0'时} \end{cases} \quad (2)$$

由于两种码元波形相同, 极性相反, 故 BPSK 信号可以表述为一个双极性全占空矩形脉冲序列与一个正弦载波相乘, 即:

$$e_{BPSK}(t) = s(t) \cos \omega_c t \quad (3)$$

其中,

$$s(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) \quad (4)$$

基本流程如下: 基带信号经过码型转换后与载波相乘, 生成调制信号; 调制信号经过带通滤波器, 滤除高频噪声和不必要的频率分量; 然后通过乘法器将信号与同频同相的载波进行相乘以实现解调; 解调后的信号通过低通滤波器进行波形平滑; 最后, 抽样解调器结合定时脉冲以恢复原始的基带信号。

2 信道传输影响因素仿真验证

2.1 信道传输模型建立

无线磁感应通信技术基于法拉第电磁感应定律, 发射线圈将交流电信号转换为磁信号, 而接收线圈则将磁信号再次转换为电信号。磁感应线圈的通信模型如图 2(a) 所示, 分析不同接受线圈对信道传输的影响, 一发单收无线磁感应通信模型如图 2(b), 一发三收如图 2(c), 发送线圈单轴多匝, 位于原点, 接收线圈圆心位于点 P, 其单位法向量为 n , α, β, γ 分别表示接收线圈法向量与坐标轴正方向的夹角, 输入信号 $I = I_0 \sin(\omega t)$; 全向线圈由两两正交的 3 个半径和匝数相同的线圈构成, 线圈之间互感为 0。

根据公式推导可得单向接收线圈接收电压为^[19]:

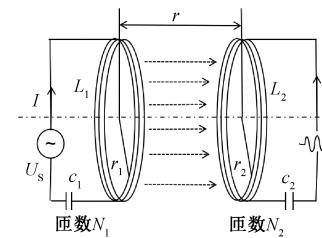
$$E = E_x + E_y + E_z = -N_r \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu_0 N_r N_s S_r}{4\pi r^5} I_0 \omega \times$$

$\cos(\omega t)[3xz \cos \alpha + 3yz \cos \beta + (2z^2 - x^2 - y^2) \cos \gamma]$ (5)
式中: $S = \pi r^2$, 发射线圈面积; 真空中磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

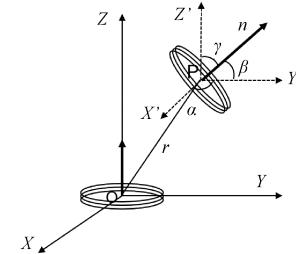
由式(5)可知, 在位置固定的情况下, 感应电压 E 的峰值大小与 α, β, γ 相关, 在线圈匝数面积和位置固定的前提下, 绕 x 轴旋转线圈角度 θ , E 的数值变化趋势如图 3 所示。

从图 3 中可以看出单轴线圈在接收调制解调信号过程中受自转角度影响显著, 当线圈法向量与磁感应强度方向一致时, 接收到的信号强度最大, 而当线圈法向量与磁感应强度方向不匹配时, 会导致接收效率下降或信号失真。这种强烈的信号强度波动表明单相线圈在接收调制解调信号时表现不稳定, 严重影响其作为传输信号的可靠性和稳定性。

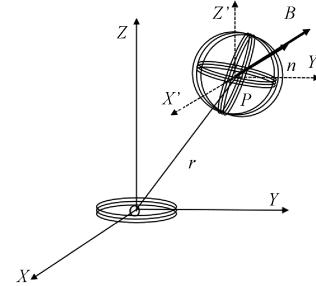
对于全向线圈, 由于三线圈相互独立, 其接收电压经过化简可得^[19]:



(a) 电磁感应线圈通信模型
(a) Electromagnetic induction coil communication model



(b) 一发单收无线磁感应通信模型
(b) One order receive wireless magnetic induction communication model



(c) 一发三收无线磁感应通信模型
(c) One-point-three-receive wireless magnetic induction communication model

图 2 无线磁感应通信模型图

Fig. 2 Wireless magnetic induction communication model

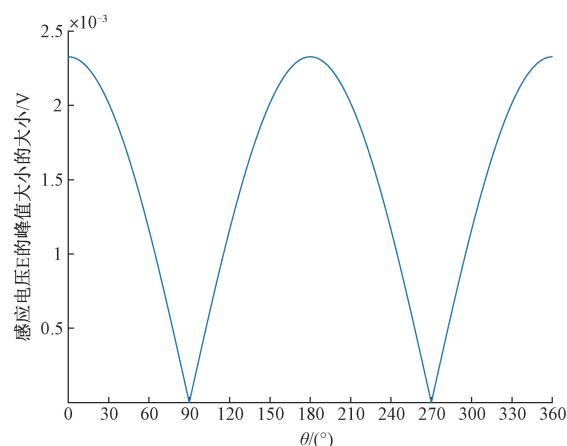


图 3 E 的数值随 θ 变化曲线

Fig. 3 Curve of the value of E with θ

$$\text{得分 } E(t) = -\frac{\mu_0 N_r N_s S_r}{4\pi r^5} I_0 \omega \cos(\omega t) \times$$

$$\sqrt{(3xz)^2 + (3yz)^2 + (2z^2 - x^2 - y^2)^2} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,当接收线圈为全向线圈时,感应电压的峰值不受线圈旋转角度的影响,保持恒定且与单轴线圈接收到的最大感应电压相等。因此,三维正交线圈能够显著提高接收线圈在自转情况下的通信稳定性,全向线圈接收信号的大小仅与距离有关。

从距离远近分析全向天线对接受电压影响,根据后续实验设置线圈匝数为 $N_t = N_r = 50, a_t = a_r = 0.1 \text{ m}$, xyz 从 1 开始不断增加,运行结果如表 1 所示。

表 1 全向线圈接收感应电压值

Table 1 Value of inductive voltage received by omnidirectional coil

x/m	y/m	z/m	d/m	$E/(\text{mV})$
1	1	1	1.732	42.194
2	2	2	3.464	5.274
3	3	3	5.196	1.563
4	4	4	6.928	0.659
5	5	5	8.660	0.338
6	6	6	10.392	0.195
7	7	7	12.124	0.123
8	8	8	13.856	0.082
9	9	9	15.588	0.058
10	10	10	17.321	0.042

通过实验结果可以看出,随着距离的增加,接收线圈的感应电压显著下降。初始距离为 1.732 m 时,感应电压达到 42.194 mV,而在距离达到 17.321 m 时,感应电压降至 0.042 mV。从式(6)中可以看出,当接受信号不变时,线圈通信距离与线圈匝数和面积成正比,即传输同样的信号时,线圈面积越大,匝数越大,能传输的距离越远,实际使用中需综合考虑线圈电感与设备体积进行设计。同时还可以考虑采用中继线圈、使用更高性能的材料、引入谐振电路等技术手段,有效提升磁感应通信的远距离传输能力。

综上所述,当距离固定时,全向线圈相较于单轴线圈在接收调制解调信号时具有显著优势,用全向线圈进行 BPSK 调制解调通信时,其设计不受线圈自转角度影响,能够在各个方向上均匀接收信号,接收到的信号仍保留了调制信息,且能够提供不同方向的相位和幅度信息,为后续解调信号提供了有效价值,从而提高信号接收的稳定性和可靠性。

2.2 海水对信道传输的影响

在 BPSK 水下磁感应通信中,主要影响因素包括海水中涡流效应、信号衰减、环境噪声等。噪声通过调节滤波器和采用 BPAK 信号来减轻影响,后续主要针对涡流效应和信号衰减进行分析。当交变磁场通过海水时,会在海水中产生涡流,生成与原始磁场相反磁场,导致磁场衰减和相位偏移,引入衰减系数 K ,定义为海水中某点的磁场强度与自由空间中对应位置的磁场强度之比(交变磁偶极子与静磁偶极子($\omega=0$)磁场分量的比值),磁场在海水中的传播相

移则用相移系数 ϕ 来表示^[20-21]。

$$K_R = \frac{H_R}{H_{R0}} = \sqrt{1+2x+2x^2} e^{-x} \quad (7)$$

$$\varphi_R = -x + \arctan \frac{x}{1+x}$$

$$K_\theta = \frac{H_\theta}{H_{\theta0}} = \sqrt{1+2x+2x^2+4x^3+4x^4} e^{-x} \quad (8)$$

$$\varphi_\theta = -x + \arctan \frac{x+2x^2}{1+x}$$

$$K_r = \frac{H_r}{H_{r0}} = \sqrt{1+2x+2x^2+\frac{4}{3}x^3+\frac{4}{9}x^4} e^{-x} \quad (9)$$

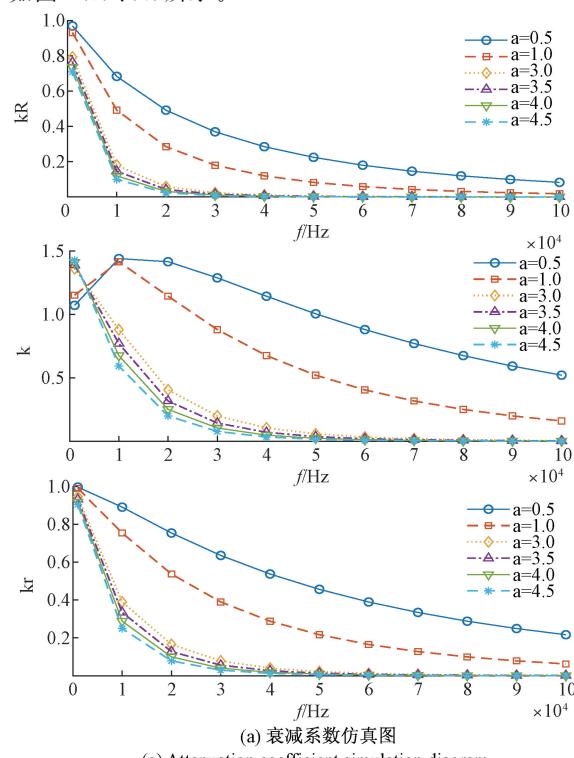
$$\varphi_r = -x + \arctan \frac{x+\frac{2}{3}x^2}{1+x}$$

其中, H_R, H_θ, H_r 表示海水中某点磁场分量; $H_{R0}, H_{\theta0}, H_{r0}$ 表示静磁场分量, x 为数值距离,与距离和介质特性有关。

$$x = r \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}} \quad (10)$$

式中: μ 为海水磁导率, $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; σ 为海水电导率; ω 为电磁场变化的角频率, $\omega = 2\pi f_0$ 。

其中海水磁导率与真空磁导率几乎相同,且在不同环境条件下几乎不变;而海水的电导率受温度、盐度和压力的影响大,在 UUV 工作范围内,约在 3 S/m~5 S/m 之间;频率与输入信号有关。在距离固定的前提下,分析不同频率、不同电导率下磁信号在海水中的衰减和传播特性,实验结果如图 4(a)、(b)所示。



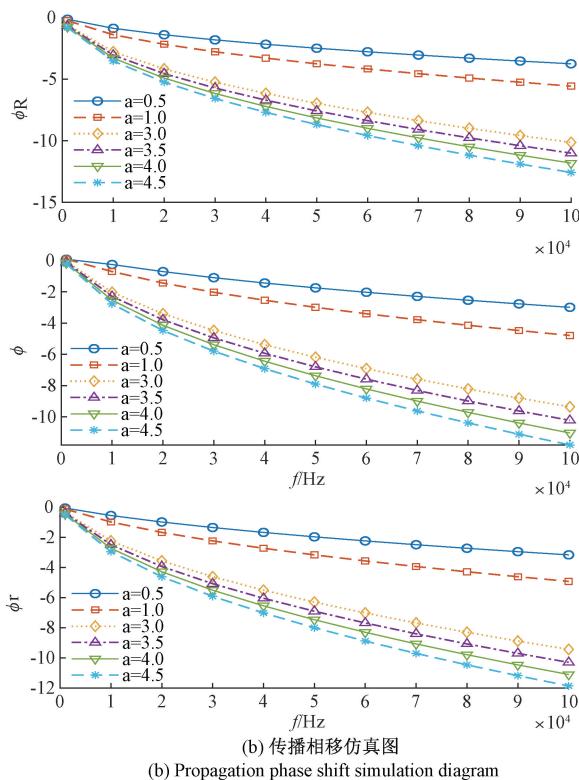


图 4 衰减系数与传播相移仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of attenuation coefficient and propagation phase shift

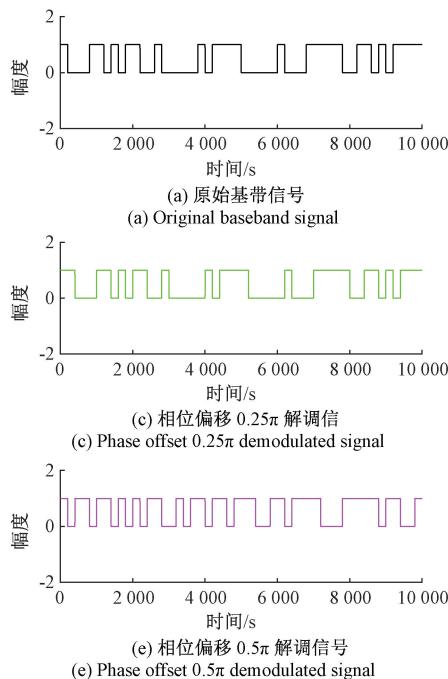


图 5 相位偏移仿真结果图

Fig. 5 Phase migration simulation results

处理技术,通过采样、离散时间滤波和数控振荡器(numerically-controlled oscillator, NCO)来实现相位锁定。

从公式可以看出, (K, ϕ) 与 (ω, σ, r) 正相关。从实验结果可以看出,在传播距离不变的前提下,电导率一定时,频率越高,信号的传播衰减越大,相位偏移越明显,在高频下信号的有效传输距离大大缩短;频率一定时,电导率越大信号的传播衰减越大,相位偏移越明显,后续实验选择低频信号进行实验。

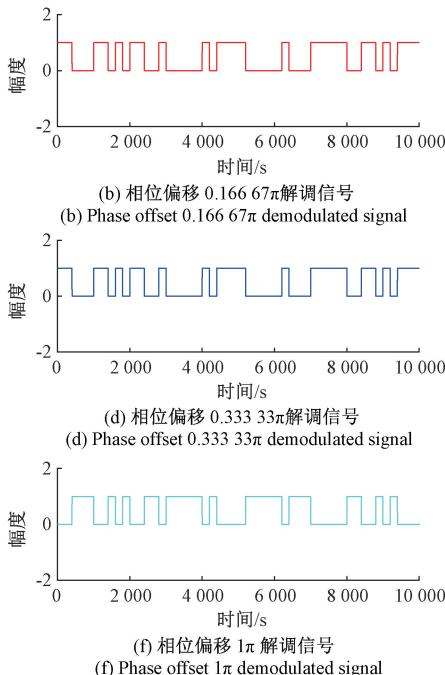
因此,通过在调制信号上加入相位偏移、噪声和衰减模拟海水对信道传输的影响,计算不同相位偏移下的解调信号与原始基带信号的误码率,绘制原始基带信号及不同相位偏移下的解调信号,如图 5 所示。

根据仿真结果可知,相位偏移从 $\pi/6$ 到 π ,误码率从 0.008 增加到 0.046,呈现出随着相位偏移增加误码率也增加的趋势,这符合相位偏移对 BPSK 解调影响的预期,在相位偏移到达 π 时,误码率最高,接近一半的信号解调错误,与相位反转导致的解调误差一致,因此需考虑载波同步问题。

2.3 载波同步对信道传输的影响

从不同算法和参数调优两方面入手,分析 BPSK 磁感应通信中载波同步对信道传输的影响。

数字锁相环(digital phase-locked loop, DPLL)和模拟锁相环(analog phase-locked loop, APLL)的主要区别在于信号处理方式。APLL 使用模拟电路元件和压控振荡器(voltage-controlled oscillator, VCO)来连续地调节相位和频率,从而锁定输入信号的相位。DPLL 则使用数字信号



用 Simulink 仿真对比两种锁相环,结果如图 6。

结果得出:模拟锁相环锁定精度较高,但收敛速度较

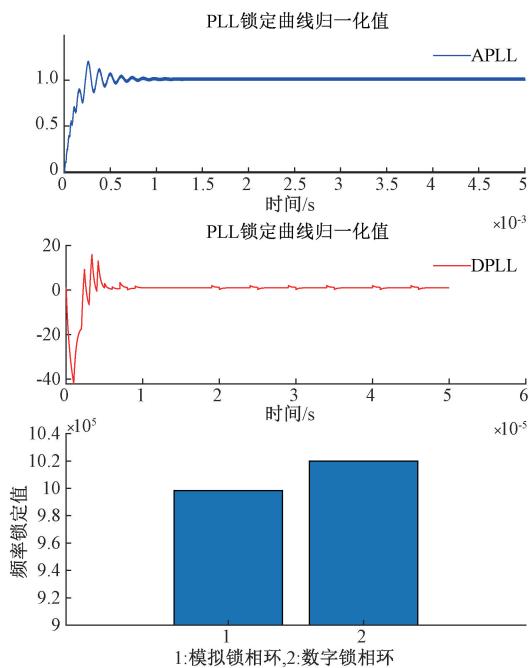


图 6 Simulink 仿真两种锁相环结果图

Fig. 6 Simulink simulation results of two PLLs

慢;数字锁相环锁定精度较低,但收敛速度较快。

算法参数调优:模拟 BPSK 调制解调过程,通过改变环路增益和滤波器带宽优化锁相环,对比解调波形如图 7 所示,仿真结果可得未优化锁相环的误码率:0.47,优化锁相环误码率:0.002,通过参数调优,减小了信号中的噪声影响,提高了信号质量,优化后的解调波形更接近原始比特流,误码率显著降低。

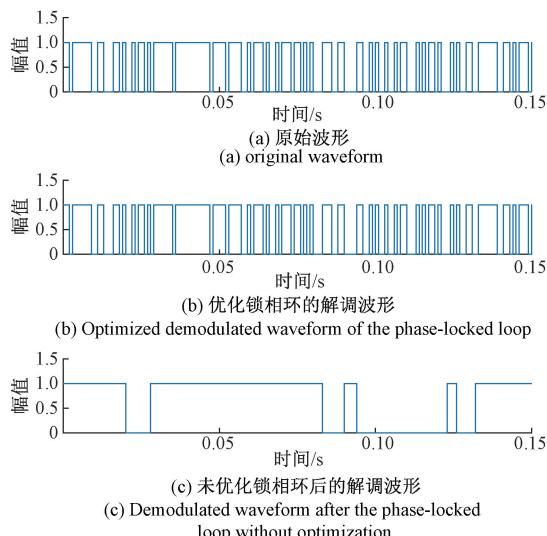


图 7 算法参数调优仿真结果图

Fig. 7 Simulation results of algorithm parameter tuning

2.4 载波频率对信道传输的影响

通过对比不同载波频率下的误码率,研究不同载波频

率对信道传输的影响,通过锁相环技术来实现载波同步,载波频率 200~220 Hz,锁相环锁相范围 210~215 Hz,仿真结果如图 8 所示。

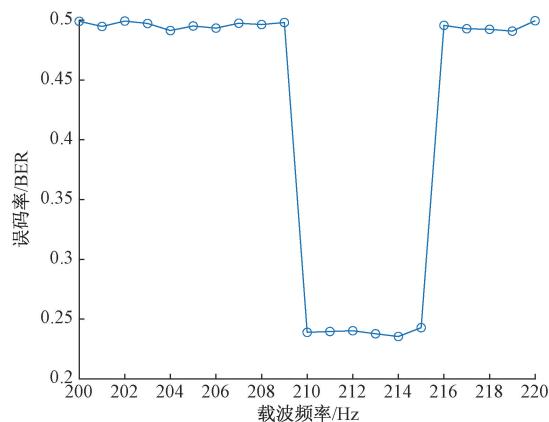


图 8 BPSK 误码率随载波频率变化曲线

Fig. 8 BPSK bit error rate curve with carrier frequency

从仿真结果中可以观察到在载波频率为 200~209 Hz,以及 216~220 Hz 之间的误码率基本保持在 0.488~0.497 8,接近于 0.5 这,表明在锁相环锁相范围外,信号解调的误码率较高;然而,在载波频率为 210~215 Hz 之间,误码率显著降低到 0.229~0.243 4,远低于其他频率范围,这表明在锁相环锁相范围内,信号解调更为有效,误码率明显减少。因此,在设计 BPSK 系统时,根据载波频率精确设计锁相环频率至关重要,以确保系统能够在较低的误码率下工作。

3 基于 BPSK 的磁感应通信系统实验

3.1 MATLAB 仿真分析

综上所述,综合考虑影响因素,用 Matlab 仿真水下 BPSK 磁通信过程,包括信号生成、调制、海水涡流、滤波、解调和载波同步等步骤,变换不同噪声水平进行多次仿真实验,误码率变化曲线如图 9 所示。

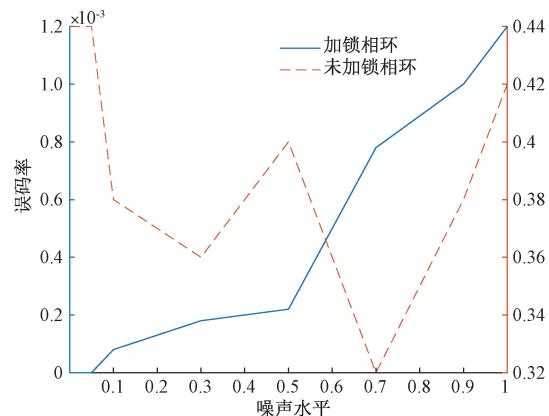


图 9 不同噪声下误码率结果曲线

Fig. 9 Result curve of bit error rate under different noises

从图 9 中可以看出,未加锁相环系统误码率稳定在 0.4 附近,加锁相环后,误码率在低噪声条件下显著降低,接近于 0,随着噪声水平的增加而逐渐上升,但仍远小于未加锁相环情况。此时,可以通过优化锁相环和滤波器的参数,进一步改善系统性能。

部分仿真过程如图 10 所示。

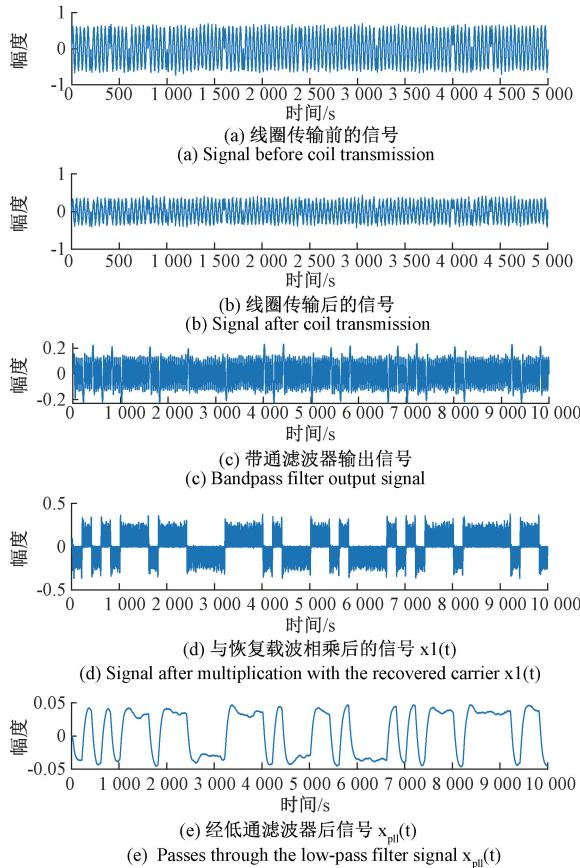


图 10 BPSK 仿真过程图

Fig. 10 BPSK simulation process diagram

此时基带信号,未加、加锁相环对比如图 11 所示。

在仿真过程中,创新性地考虑了相位偏移、噪声和信号衰减等因素对通信信道的影响,可以通过调整相位偏移值和衰减因子,模拟不同条件下的系统表现,更好地理解并预测系统性能。引入锁相环进行载波同步后,信号解调的准确性显著提高,仿真结果表明,未加锁相环时系统误码率平均高达 0.4,无法正确解调信号;加锁相环后,误码率显著降低至 10^{-3} 数量级,显著提升了系统性能,降低了误码率,验证了滤波、载波同步技术的有效性和 BPSK 磁感应通信的可行性,为后续实测实验提供了基本保障。

3.2 实验验证

设计基于 BPSK 磁通信系统,主要模块如图 12 所示。

具体实验流程如下:信号发生器生成 200 kHz 载波信

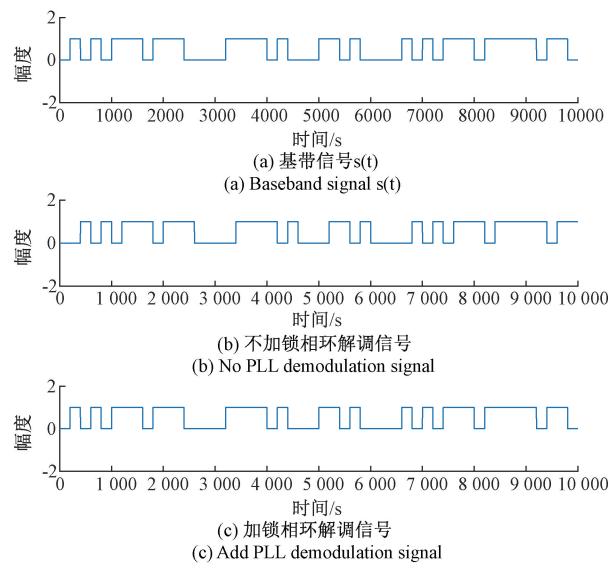


图 11 结果对比图

Fig. 11 Comparison of results

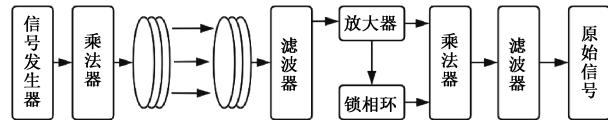


图 12 BPSK 的磁通信系统流程图

Fig. 12 Flow chart of magnetic communication system of BPSK

号与 50 kHz 方波信号输入乘法器后,再通过 $N = 50, R = 20$ cm 铜线线圈进行传输,将线圈接受信号经过滤波器过滤大部分噪声,再经过放大器,通过调节 VCO 负载电阻调整锁相环频率范围为 95~105 kHz 生成载波信号,将二者输入乘法器产生解调信号,最后经过滤波器恢复原始信号,具体实验电路如图 13 所示。

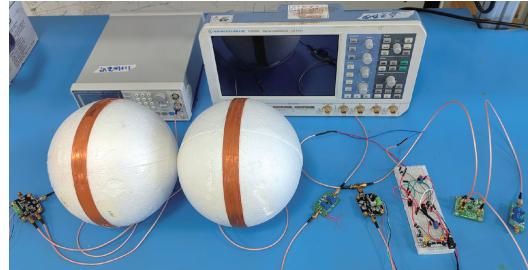


图 13 实验电路图

Fig. 13 Experimental circuit diagram

图 14 为恢复信号与原始方波信号,实验结果表明,系统能够有效恢复输入信号,展现出较好的信号完整性和传输稳定性,验证了系统在实际环境中的可行性和可靠性。这一设计为远距离磁通信的实际应用提供了支持,也为后续性能优化和更复杂环境中的应用奠定了基础。

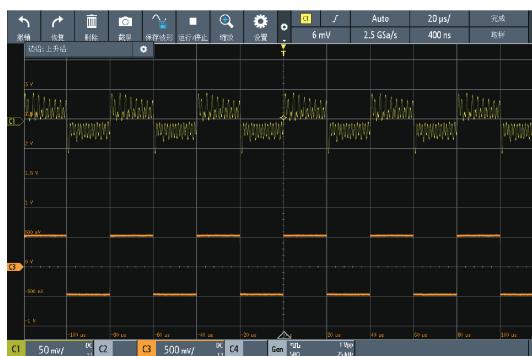


图 14 实验结果图

Fig. 14 Experimental results

4 结 论

搭建了基于 BPSK 的磁感应通信系统基本框架，并通过理论与仿真分析了信道传输模型、海水涡流效应及载波同步等因素的影响。对比一发单收与一发三收模型，表明全向线圈在固定距离下能够提高信号接收的稳定性和可靠性；分析海水涡流效应对低频信号的影响发现，涡流会带来的衰减与相位偏移；载波同步可明显降低误码率；通过锁相环的选择和参数优化，系统通信效果得到显著提升。实验结果验证了 BPSK 磁感应通信的优越性能，展示了其在实际应用中的可行性和实用性，为实际应用提供了技术支持和优化方向，也为水下磁感应通信领域提供了新的研究方向。

研究仍存在的问题：未针对不同水深、盐度和压力对信号的衰减与相位偏移影响的量化分析，在海洋环境下，海流、波浪等因素会引入随机噪声和相位变化，PLL 参数在复杂海洋环境下的自适应性能也需进一步探讨，以确保系统在动态环境中的鲁棒性和低误码率，现阶段的硬件实验仍以各模块独立运行为主，尚未实现系统的高度集成化，后续将进一步探索系统集成化方案，且实验是在水箱中进行，仍与实际的海水环境存在显著差异。

参考文献

- [1] 李苏苑. 海洋水下拖曳式三分量磁测系统误差校正与干扰补偿方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
LI S P. Research on error correction and interference compensation method of Marine underwater towed three-component magnetic survey system [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [2] 李士杰. UUV 集群路径规划及自主避障方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
LI SH J. UUV cluster and autonomous obstacle avoidance path planning method research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [3] PREETI S, PAL R S, ADWITIYA S. Path loss assessment of electromagnetic signal on air-sea and air-soil boundary in sensor networks [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2024, 15(6): 2238-2247.
- [4] 罗文鑫. 基于 OFDM 的宽带磁感应通信系统的研究与设计[D]. 福州: 福州大学, 2021.
LUO W X. Research and design of broadband magnetic induction communication system based on OFDM[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021.
- [5] 杨晓蕾. 基于磁感应的水下无线通信技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
YANG X L. Based on the induction of underwater wireless communication technology research [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [6] 刘杰, 曹亮. 基于水下无人作战平台的反潜攻防模式设计[J]. 舰船电子工程, 2024, 44(2): 180-183.
LIU J, CAO L. Design of anti-submarine attack and defense mode based on underwater unmanned combat platform [J]. Ship Electronic Engineering, 2024, 44(2): 180-183.
- [7] 孙彧, 潘宣宏, 王幸军, 等. 无人潜航器装备技术发展及作战运用研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(21): 104-109.
SUN Y, PAN X H, WANG X J, et al. Research on equipment technology development and combat application of unmanned underwater vehicle[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(21): 104-109.
- [8] 马亮, 张佳琪, 孙新溢, 等. 基于 Ad Hoc 模式下的 UUV 水下通信组网技术研究[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(6): 24-26, 30.
MA L, ZHANG J Q, SUN X Y, et al. Based on Ad Hoc mode of UUV underwater communication networking technology research[J]. Journal of Digital Technology and Application, 2021, 39(6): 24-26, 30.
- [9] XUE L S, LI X, WU W R, et al. Multifunctional signal design for measurement, navigation and communication based on BOC and BPSK modulation [J]. Remote Sensing, 2022, 14(7): 1653.
- [10] ASI S A H, RIKAN B S, HEJAZI A, et al. A design of analog front-end with DBPSK demodulator for magnetic field wireless network sensors[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7217.
- [11] 朱家莹. 基于三向天线的水下磁感应通信技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
ZHU J Y. Based on the three to the antenna of the underwater magnetic induction communication technology research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [12] 张嘉辉. 水下磁感应通信技术研究与验证[D]. 杭州:

- 浙江大学,2022.
- ZHANG J H. Underwater magnetic induction communication technology research and validation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [13] 范泽国. 基于磁感应的水下无线通信技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- FAN Z G. Based on the induction of underwater wireless communication technology research [D]. Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [14] 赵东阳,蔡文郁,刘一博,等. 基于磁感应通信的水下链式网络 MAC 协议研究[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版),2024,44(1):14-22,62.
- ZHAO D Y, CAI W Y, LIU Y B, et al. Underwater chain network MAC protocol based on magnetic induction communication study [J]. Journal of Hangzhou University of Electronic Science and Technology(Natural Science Edition), 2024, 44 (1): 14-22,62.
- [15] 颜家儒. 基于磁耦合的高效水下非接触式通信方法研究[J]. 电子制作,2019(16):15-17,12.
- YAN J R. Research on high-efficiency underwater non-contact communication method based on magnetic coupling [J]. Journal of Electronic Manufacturing, 2019(16):15-17,12.
- [16] 柴彬彬,张歆. 跨空海界面磁感应通信特性分析及应用[J]. 舰船科学技术,2022,44(21):129-135.
- CHAI B B, ZHANG X. Characteristics analysis and application of magnetic induction communication at air-sea interface [J]. Ship Science and Technology, 2022,44(21):129-135.
- [17] 刘宝衡,付天晖,侯文达. 两种磁感应通信信道建模与特性分析[J]. 电子测量技术,2021,44(16):18-22.
- LIU B H, FU T H, HOU W D. Modeling and characteristic analysis of two kinds of magnetic induction communication channels [J]. Electronic Measurement Technology, 2021,44(16):18-22.
- [18] 熊仁杰. 水下磁感应图像传输系统设计[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
- XIONG R J. Design of underwater magnetic induction image transmission system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [19] 韩滨澧,张晓明,李欣甜. 三维正交线圈磁通信信道稳定性分析[J]. 电子测量技术,2023,46(23):175-180.
- HAN B L, ZHANG X M, LI X T. 3D orthogonal coil magnetic communication channel stability analysis[J]. Journal of Electronic Measurement Technology, 2023, 46(23):175-180.
- [20] XU H L, GU T T, ZHU Y, et al. Communication with a magnetic dipole: Near-field propagation from air to undersea [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021,69(2):1052-1064.
- [21] 黎渝歆. 甚低频电磁波跨空气-海水界面传播特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- LI Y X. Very low frequency electromagnetic wave propagation across the air-water interface research [D]. Xi'an: Xi'an Xidian University, 2023.

作者简介

李欣甜,硕士研究生,主要研究方向为无线磁感应通信、水下磁目标通信导航一体化、水下磁目标定位。

E-mail:15110454860@163.com

张晓明(通信作者),教授,博士研究生导师,主要研究方向为动态测试与组合导航。

E-mail:zxm_auto@nuc.edu.cn

张鸽,博士研究生,主要研究方向为微弱磁信号处理及智能组合导航。

E-mail:gezhang_auto@163.com