

引文格式:

何发瑛, 黄峻健, 赵毓斌, 等. 基于磁耦合的水下无线携能通信系统 [J]. 集成技术, 2021, 10(2): 85-97.

He FY, Huang JJ, Zhao YB, et al. Underwater simultaneous wireless information and power transfer system based on magnetic resonance [J]. Journal of Integration Technology, 2021, 10(2): 85-97.

基于磁耦合的水下无线携能通信系统

何发瑛^{1,2} 黄峻健¹ 赵毓斌^{3*} 须成忠⁴

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(中国科学院大学 北京 100049)

³(中山大学微电子科学与技术学院 珠海 519082)

⁴(澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室 澳门 999078)

摘要 磁耦合无线充电技术不仅能够为水下设备不间断地提供能量, 同时在其传输能量上加载特定的信号也可以为水下设备构建高速、稳定的数据传输链路, 成为摆脱水下设备供电以及通信瓶颈的有效手段。该文提出一种基于磁耦合的水下无线携能传输技术, 采用现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 开发了基于频移键控 (FSK) 调制的无线信息传输和无线能量传输模块, 输入功率为 20 W 时, 可实现 1 Mbps 传输速率的无线充电设备水下低功率损耗数能同传。针对水下设备的移动需求导致信道变化的问题, 使用支持向量机 (SVM) 机器学习的方法进行数据解码, 实现了 99.9% 的解码成功率。实验结果显示, 该文所开发的无线携能传输原型系统在高速率、远距离传输条件下, 具有良好的能量传输效率和信号解码准确率。

关键词 水下通信; 磁共振; 携能传输; 机器学习; 支持向量机

中图分类号 TN 929.3 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20201119003

Underwater Simultaneous Wireless Information and Power Transfer System Based on Magnetic Resonance

HE Faying^{1,2} HUANG Junjian¹ ZHAO Yubin^{3*} XU Chengzhong⁴

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(School of Microelectronics Science and Technology, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)

⁴(State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China)

*Corresponding Author: zhaoyb23@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-19 修回日期: 2020-12-17

基金项目: 深圳市基础研究(自由探索项目)(JCYJ20180302145755311)

作者简介: 何发瑛, 硕士研究生, 研究方向为水下无线充电和水下携能通信; 黄峻健, 工程师, 研究方向为磁共振无线充电技术; 赵毓斌(通讯作者), 副教授, 研究方向为无线充电、无线携能通信技术以及室内定位, E-mail: zhaoyb23@mail.sysu.edu.cn; 须成忠, 教授, 研究方向为人工智能、云计算和大数据系统。

Abstract Magnetic resonance wireless power transfer can provide continuous energy for the underwater equipment. Moreover, the energy waves carrying information can also construct a high speed and reliable channel for data communications. Therefore, both the power supply and data transfer bottlenecks are broken. In this paper, an underwater simultaneous wireless information and power transfer (USWIPT) technique is investigated. A prototype based on field programmable gate array (FPGA) was developed, and the frequency-shift keying (FSK) modulation was employed to achieve wireless information and power transfer. While the input power is 20 W, the data rate is about 1 Mbps with low power consumption in the underwater environment. To avoid the channel changes due to the mobility of underwater devices, a support vector machine (SVM) based method was proposed for the signal decoding. Experimental results showed that, the proposed system can work under the high speed transmission and long distance, and the decoding accuracy can reach 99.9%.

Keywords underwater communication; magnetic resonance; USWIPT; machine learning; SVM

Funding This work is supported by Shenzhen Fundamental Research (JCYJ20180302145755311)

1 引 言

信息科学技术的高速发展,为在深度与广度两个维度的海洋研究拓展提供了有力的支撑。其中,水下设备的能量供给和数据传输具有巨大和迫切的需求,如可以持续水下作业的水下机器人、水下传感器等。但在能量供给方面,因为水下设备防水的缘故,需要采用防水电缆或频繁更换电池,这样大大影响了水下设备单次作业的时间以及可移动范围。

无线充电技术可以协助水下设备摆脱电池寿命的局限,支持水下设备长时间大范围的持续作业。当前主流的无线充电技术有磁感应式和磁耦合谐振式两种。麻省理工学院与伍兹霍尔海洋研究所共同研发的水下无线充电平台、及德国 MESA 公司设计的水下无线充电装置,均使用了基于电磁感应的无线充电技术^[1-2]。其中电磁感应方式对收发设备之间的距离以及稳定性要求非常高。另有一些研究表明,采用磁共振无线充电技术方案,具有充电效率较高、自由度大和距离远的优势。早期的研究证明,基于磁共振耦合的

水下无线充电可在 15 cm 的距离下,实现 1 kW 级别的能量传输^[3]。日本电气股份有限公司 (NEC) 研制的水下无线充电 (WPT) 系统,在间距 5 cm 时工作效率达到 50%^[4]。葡萄牙学者通过对谐振结构进行改进,可在 4 cm 距离下输出 35 W 的直流电^[5]。

此外,在一定距离内的磁通信也是一种良好的水下通信方式,具有穿透力强、不易受干扰且稳定^[6-7]等优点。这种通讯技术与利用电磁感应原理的无线充电技术结合,是一种新型的通信技术——无线携能传输技术 (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT),区别于传统的信息传输仅仅传输数据,其可以在设备进行供电的同时提供信息传输。与水声通信、激光通信以及水下量子通信^[8-10]的水下通信技术相比,水下无线携能传输技术还具有速率高和信道相对稳定的优点^[11-12]。这无疑是一些可穿戴和便携式设备的电池使用寿命问题带来了解决方案^[13-15]。

无线携能传输解决技术主要有分离式机制和综合式机制,二者主要区别为在结构上能量收集 (Energy Harvesting, EH) 和信息解码 (Information

Decoding, ID) 是否共信道传输^[16-17]。其中, 综合式机制共有 3 种, 分别为时间切换方式、功率分割方式和联合方式^[18-20]。时间切换技术通过时分复用分别传输用于 ID 和 EH 的信号, 按时间周期 T 进行分割, βT 时间内进行能量传输, $(1-\beta)T$ 时间内进行数据传输。功率分割技术则按传输功率 P 进行分割, αP 的功率分配到能量传输, $(1-\alpha)P$ 的功率分配到数据传输。以上两种方式在系统设计上都需要较复杂的电路辅助和算法实现, 增大了发射端的设计难度。联合方式则是在同一时间内, 既传输数据也传输能量, 并不需要过多的电路和算法的系统设计, 是比较容易实现的方式。

水下磁耦合无线携能传输技术的主要难点在于, 水下设备自身的移动特性导致信道仍然会随着时间变化^[6]。此外, 磁耦合谐振技术自身的频率分裂和阻抗匹配等问题使得信号传输具有明显的频率选择特性, 表现为不同载波频率下的携能信号在较远的传输距离下不再是等幅度的信号, 使得信号发生了非线性的形变^[21]。而传统的解调和均衡方式很难提取高可靠的信息。

但在外部环境不改变的情况下, 频率的特性能够保持短时的一致性——同一距离下同一频率的信号经过耦合线圈后, 其信号发生的形变特征是不变的。这种短时的特征不变性可以采用机器

学习算法进行有效的分析和建模, 并可通过其学习的模型对信号进行解调。针对水下设备对于远距离无线能量和高速数据传输的需求, 本文提出基于磁耦合谐振的无线携能传输技术, 使用机器学习替换传统的解调方式, 采用现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 开发板设计了原型系统, 利用频移键控 (FSK) 调制方式实现 1 Mbps 的数据传输速率。同时针对水下信道的可变性和频率选择性, 基于支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 的在线训练和解调算法, 通过对信号采样和数据帧的分割, 提取不同频率下的信号特征, 构建了信号解调模型。实验验证结果表明, 系统在较低的功率损失下通过训练模型获得的解调误码率降低到 0.1% 以下。

2 系统结构和模型

2.1 系统框架设计

本文设计的携能无线充电系统主要由硬件电路部分和算法解码部分组成。硬件使用 FPGA 芯片实现了无线充电系统的基本功能和携能信号的产生和处理, 包括发射端的谐振信号产生、调制以及接收端的信号采集。系统框架如图 1 所示。

其中, 发射端主要由信号处理芯片 (SPC)、数模转换器 (D/AC)、功率放大器和耦合线圈组

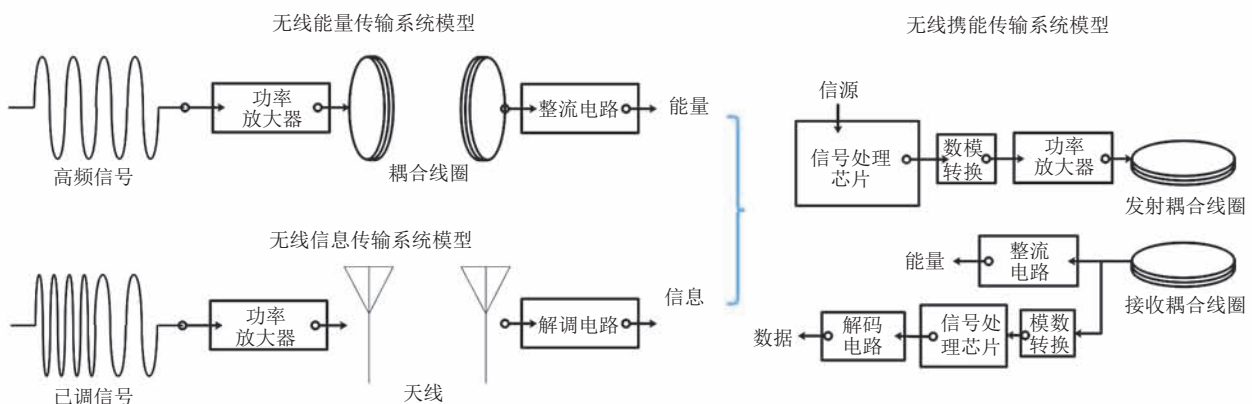


图 1 系统框架图

Fig. 1 System frame diagram

成。信号处理芯片使用 FPGA 内部的数控振荡器 (Numerically Controlled Oscillator, NCO) 和锁相环 (Phase Locked Loop, PLL) IP 核资源实现信号的产生和调制。调制信号经由 D/A/C 输出到功率放大器后, 通过耦合线圈把信号转变为磁信号。接收端有两条电路: EH 电路和 ID 电路。EH 链路负责把携能信号进行电路处理转换为电能输送到设备; ID 链路负责信息解调, 其中使用机器学习的支持向量机作为解调算法, 这是一种可对数据进行二元分类的监督学习广义线性分类器。而携能信号是一种二进制调制信号, 适合使用该算法进行二分类任务。

2.2 硬件设计

2.2.1 发射端设计

FPGA 的并行计算能力强, 具有规则的编程结构, 可实现各种逻辑功能。基于 FPGA 平台系统发射端的硬件设计如图 2 所示。发射机主要使用 NCO 和 PLL 内部集成资源。其中, PLL 用于

产生系统中各模型所需的工作频率, NCO 产生波形信号并根据信源编码信息进行频率调制。本系统中的耦合线圈, 采用的是雕刻线圈——在一片铜板上刻成的方状线圈, 并串联电容使得耦合线圈在系统的中心频率处谐振。信号经数模转换模块输出模拟信号并接入了一个已经集成的 AB 类功率放大器模块, 使得信号能量增强, 由耦合线圈把携能信号以球状的电磁场向外辐射。

正弦信号由 FPGA 内部 IP 核中的 NCO 核产生, 不仅减少开发周期, 而且也方便调试。系统根据信源编码数据, 改变频率控制字或相位控制字, 就能直接对信号进行频率或相位调制。NCO 核的工作原理如图 3 所示, 输出正弦信号的频率公式如式 (1) 所示。

$$F_{out} = f_{inc} \times 2^{M-1} / F_{clk} \quad (1)$$

其中, M 为寄存器的位宽; f_{inc} 为初始控制字, 决定了信号的输出频率; F_{clk} 为 NCO 的工作频率。当 f_{inc} 设定为 1 时, 对应的 F_{out} 则是 NCO 的

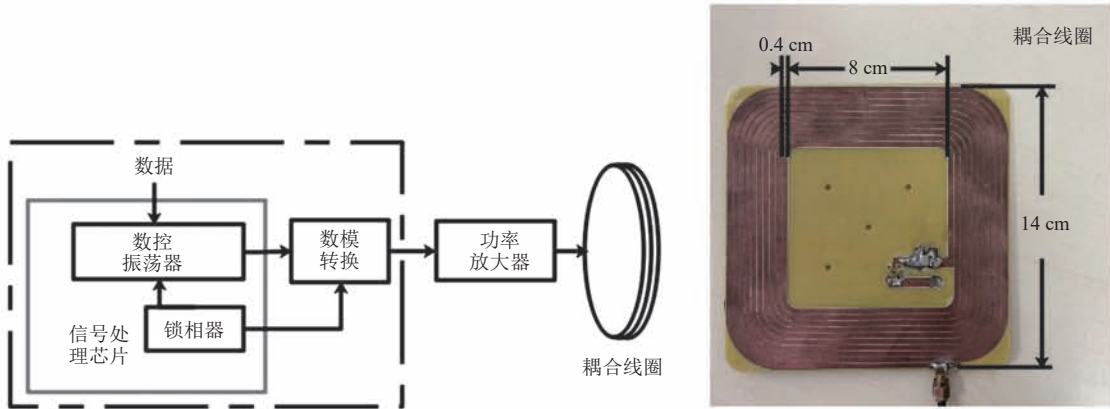


图 2 发射端设计

Fig. 2 Transmitter design

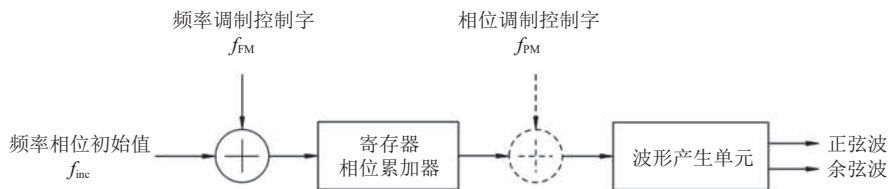


图 3 数控振荡器 (NCO) 工作原理

Fig. 3 Numerically controlled oscillator working principle

精度。NCO 还能通过系统初始化设计对信号进行 FSK 或 PSK 调制, 本文只用到了 FSK 调制。

2.2.2 接收端设计

本文的接收器单元有两条链路, 如图 4 所示。EH 链路负责把交变电流转换成平稳的直流电流。这是因为接收耦合线圈收集的携能信号是一种不平稳的交变电流, 所以需要使用整流电路转换为稳定的直流电流, 才能提供给设备进行充电。与接收耦合线圈另一端连接的是 ID 链路, 负责提取携能信号中的信息, 把模拟信号转化为数字信号(离散的数据点)并传输到解调模块(Decode)中进行数据处理。系统中每个模块的工作时钟都不同, FPGA 的 PLL 内核经过 N 倍分频后, 产生所需的多个不同频率的工作时钟并锁死。

2.3 携能信号

在 FPGA 内部, 系统将基带信号加载到高频信号进行调制。本文设计的系统使用二进制 FSK 方式对信号进行调制。码元传输速率由系统的编码时钟决定, 系统利用 FPGA 内部的 PLL 内核资源可以建立不同的编码时钟, 每次编码时钟的上升沿都会根据码元是“1”或“0”而相应地改变 NCO 频率控制字的值(即图 3 中的 f_{FM} 参数), 可以产生连续的 FSK 信号。调制后的信号通过功率放大器增大能量传输到耦合线圈, 其中传输过

程除了噪声干扰, 还有来自线圈内部电容电感的阻抗干扰。接收端获取到的经放大后的磁信号如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 不同的频率信号在不同的距离下经过线圈会产生非线性失真。这是因为谐振电路对非谐振频率信号具有选择性, 通过的信号频率与耦合线圈的谐振频率不相同时, 根据电感阻抗公式(2)和电容的阻抗公式(3)以及电路阻抗公式(4), 非谐振信号会使得电路阻抗发生改变, 导致耦合系数发生改变和频率分裂, 产生非线性的形变失真^[22]。到达接收线圈的信号幅值和相位与原始信号都不相同, 如图 5 中符号“1”的信号被较完好地接收, 但符号“0”的信号却严重失真。若要避免该现象的产生, 则需要实时改变电感感抗和电容容抗的值或调整线圈相对位置, 使电路中的耦合电感和电容相互抵消, 阻抗虚部为零。这都需要复杂的电路设计和算法得出阻抗的优化方案, 另一方面电容和电感都较难进行调节。

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot fL \quad (2)$$

$$X_C = (\omega C)^{-1} = (2\pi \cdot fC)^{-1} \quad (3)$$

$$Z = R + jX = R + j(X_L - X_C) \quad (4)$$

其中, ω 为信号角频率; j 为复数虚部单位; R 为电路纯电阻; X_L 为电感的感抗; X_C 为电容的

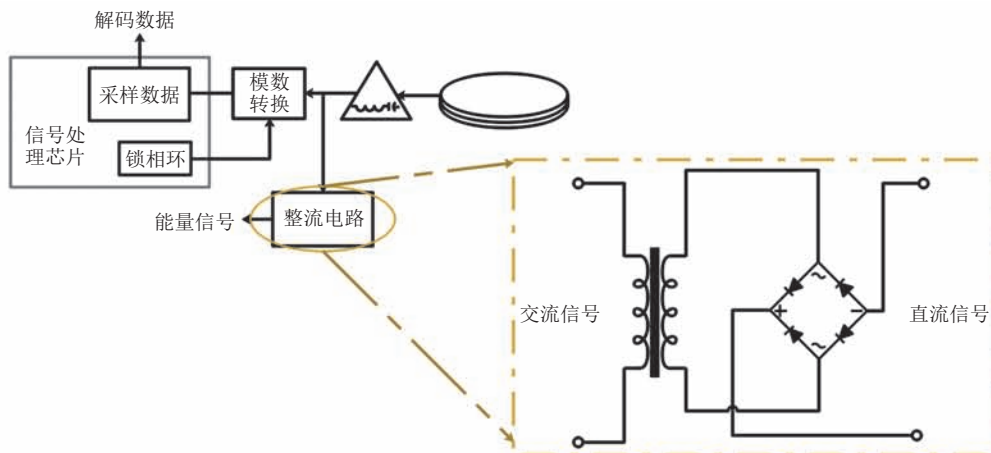


图 4 接收端设计

Fig. 4 Receiver design

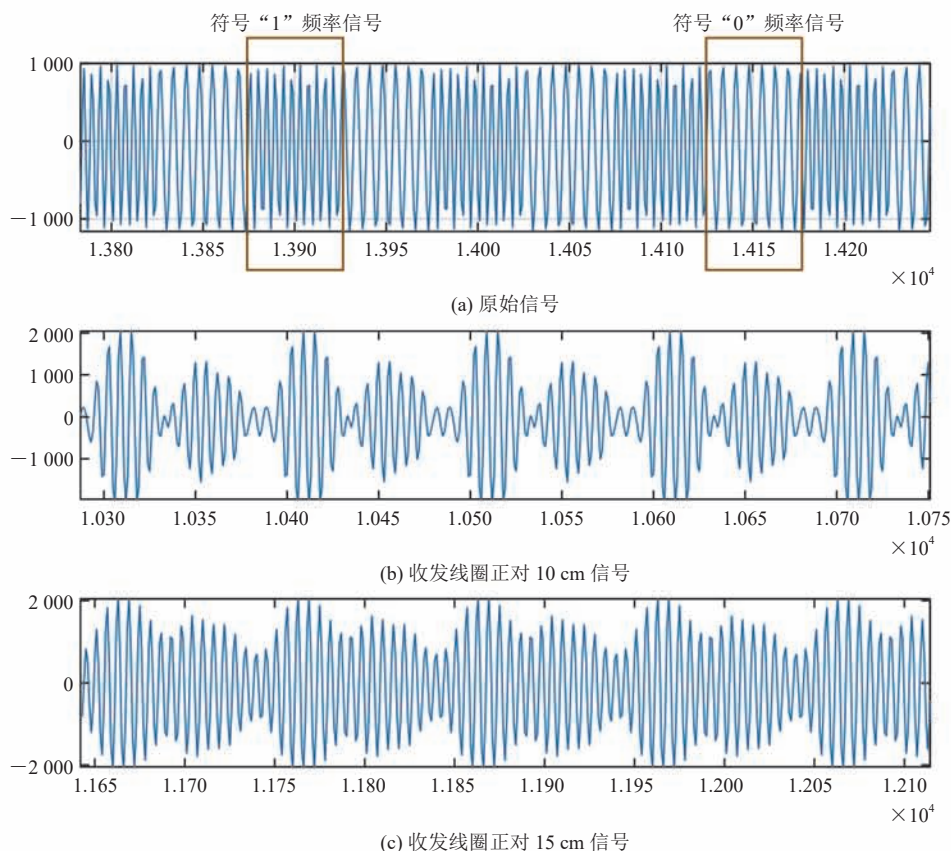


图5 磁信号的采集

Fig. 5 Magnetic signal acquisition

容抗; f 为信号频率; Z 为电路总阻抗。

3 水下携能信息的解调

3.1 非相干解调

二进制频移键控(2FSK)信号的非相干解调实现主要有: 包络检波法和过零点检测法。本文使用的是前者, 不需要载波提取的步骤, 电路简单容易实现。该解调方法主要利用带通滤波器和低通滤波器, 把信号过滤成两条支路, 其解调流程如图6所示。信号通过两个不同的带通滤波器, 把不同数据“1”和“0”频率分离。随后每条支路都经过整流和低通滤波器, 就可以得到光滑的基带波形, 上下支路相减抵消直流分量。此时, 利用门限判决器和定时脉冲就能恢复原始数据。

滤波器的设计基于 Matlab 的 Fdatool 工具,

可以直观地生成所需要的滤波器。滤波器的性能会影响最后的解调性能, 因此需要考虑好滤波器的阶数以及通频带等参数, 抑制其他无用的频率。滤波器设计完成后生成抽头系数并导入到 FPGA 内部的 FIR II 内核进行设置和实例化。

本文系统设置 FSK 的中心频率为 9 MHz、调制系数为 4, 则需要设计一个中心频率为 7 MHz 和 11 MHz 的带通滤波器, 把信号分成两个只包含一种频率的信道。因为在 FPGA 中, Digital Signal Processing (DSP) 资源有限, 所以系统设计要尽可能用更少的资源实现更好的滤波器。本系统指定滤波器的阶数为 50 阶, 使用汉明窗, 滤波器的通带带宽为 3 MHz。设计的带通滤波器如图 7 所示, 其中图 7(a) 为 7 MHz 的带通滤波器, 上频带为 5.5 MHz, 下频带为 8.5 MHz; 图 7(b) 为 11 MHz 的带通滤波器, 上频带为

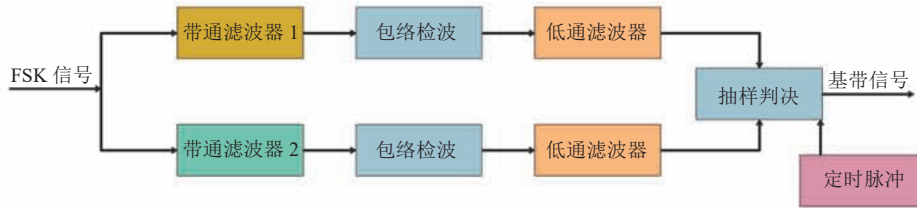


图 6 FSK 非相干解调

Fig. 6 FSK noncoherent demodulation

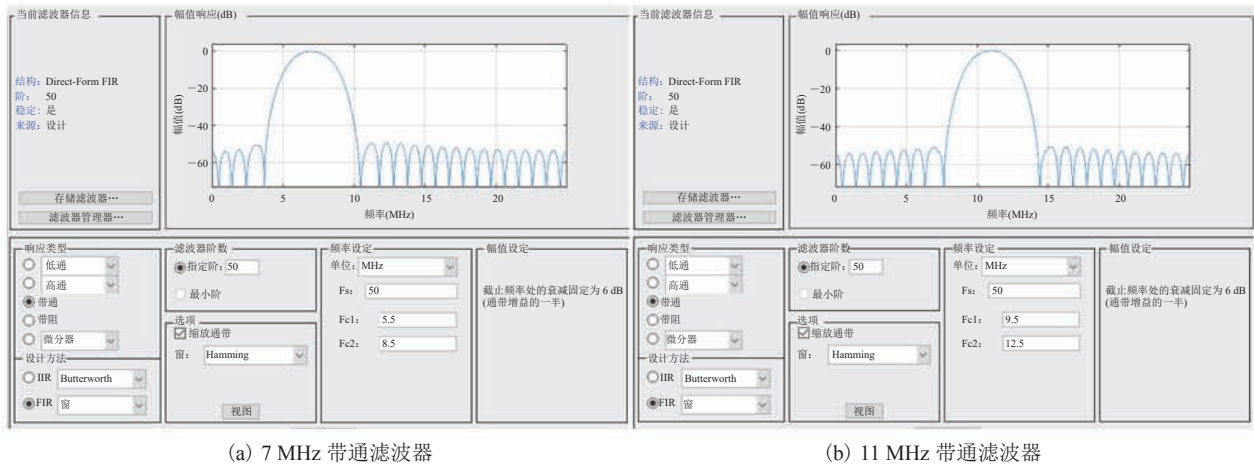


图 7 滤波器设计

Fig. 7 High-pass filter design

9.5 MHz, 下频带为 12.5 MHz。

低通滤波器的作用就是平滑两路整流后的信号, 除去信号毛刺生成两路互为相反的信号。两路光滑的信号相减就是滤去直流分量的基带波形。低通滤波器的设计, 与码元速率有关, 信号截止频率一般为码率的两倍。本文的码元速率设为 1 MHz, 则低通滤波器的截止频率为 2 MHz。为节省 DSP 资源, 低通滤波器的阶数被适当地降低, 如图 8 所示。

3.2 基于机器学习的解调方法

从图 5 分析可知, 水下携能信号在远距离时并不适合使用传统非相干解调。虽然耦合线圈对不同频率的信号具有选择性, 对信号的幅度存在非线性失真, 但在相同距离时耦合线圈对同一频率信号的影响是一致的。这是由于系统的结构是固定的, 引起的阻抗变化是相同的。因此同一种信号在通过耦合线圈后, 特征也是一样的。信号

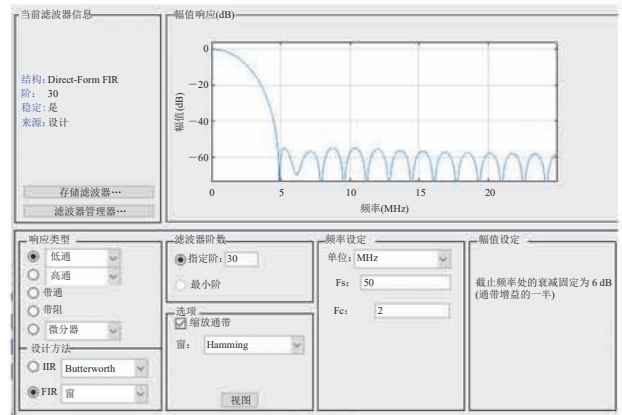


图 8 低通滤波器

Fig. 8 Low-pass filter design

解调可以抽象为一种对不同信号分类的问题。

机器学习在分类问题上有着一定的优势, 它是一种对离散型随机变量建模或预测的监督学习方法。通过从给定的人工标注的分类训练样本数据集中学习出一个函数或分类模型, 即分类器, 可以对新数据进行预测分类。因此, 本文提出基

于机器学习的解调方法。

3.2.1 信号采样及切片

接收器中的信号处理芯片 (SPC) 通过 A/DC 将接收到的模拟信号转换为数字信号并处理。当出现有效数据帧时, SPC 通过一个时间窗口将数据帧同步划分包含原始数据的“0”和“1”数据集。每个数据集包含一位符号信息, 采样的数据集如图 5 (a) 方框所示, 每个方框代表一个数据集。每个数据集的长度 L 根据 A/DC 的工作频率 F 和数据速率 B 确定。它们的关系可以表示为:

$$L = F/B + 1 \quad (5)$$

在传输数据前, 先传输一段已经预定好的、长度可设定的序列, 使得分类器在线训练好模型, 以对后续的数据进行分类。本文对发射端 (Tx) 和接收端 (Rx) 线圈在不同距离 (5 cm、7 cm、10 cm、12 cm 和 15 cm) 下的携能信号进行采样。本文收集了多达 45 万个数据, 每个距离有 9 000 个数据, 包括 3 个偏移距离 (0 cm、1 cm 和 3 cm), 并将这些数据分为训练样本和测试样本。

3.2.2 SVM 分类器

SVM 在高维中表现良好, 如在图像数据、基因数据、医学数据等具有更高的维数。若当前特征向量的分类器输出仅仅和当前的特征输入向量相关, SVM 是一个好的选择。本系统的 FSK

信号类似于医学中的心电信号, 因此系统的解码模块运用了 SVM 算法。它是一种监督学习方法对数据进行二分类的广义线性分离器^[23], 也是一种基于统计线性理论和风险最小化的机器学习算法。SVM 通常用于解决线性二分类问题——使用算法找到一个最佳的超平面, 使两种类型的样本之间的距离最大化。同时 SVM 也可以用于非线性二进制分类问题——通过使用内核技术将低维数据映射到高维空间, 在新的空间中计算得出的一个平面, 并分离两种类型的数据。

首先, 把预设序列的携能 2FSK 信号进行特征提取, 转化为携有数据“0”和“1”信息的数字标量; 然后, 对包含一位符合信息的信号特征标量打上对应标签, 并传输给向量机训练, 得到一个分类函数 $f(\vec{x}) = (\vec{w} \cdot \vec{x} + b)^p$; 最后, 将后续数据代入函数并得到结果, 若 $f(\vec{x}) > 0$, 则对应 $y = 1$ 的数据点, 反之则对应 $y = -1$ 的数据点。

4 实验结果分析

本文实现了一个基于 FPGA 的平台来评估所提出的方案, 具体如图 9 (a) 所示。其中, 使用两个不同的 FPGA 板分别作为发射机和接收机。图 9 (b) 显示在水下作业时, 手机在接收到系统

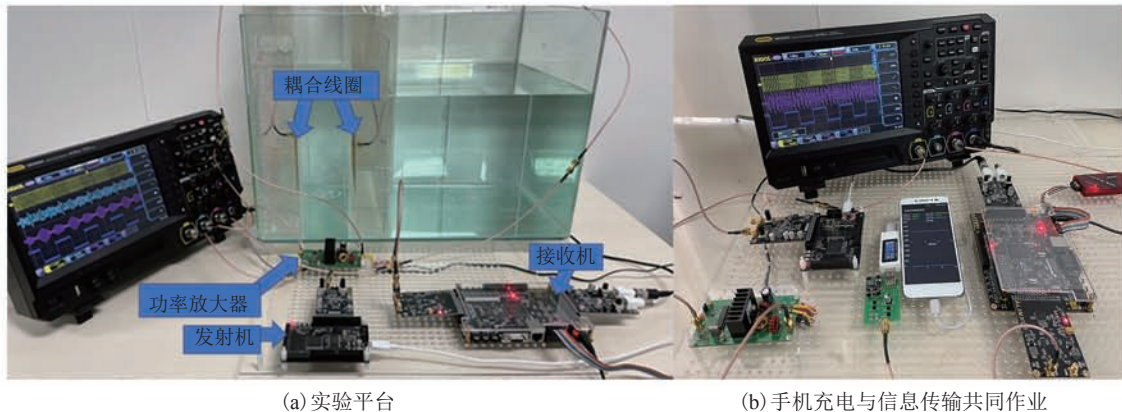


图 9 实验装置

Fig. 9 Experiment platform

提供的能量的同时, 信息也能被系统所解调。

在电子设备方面, A/DC 模块的采样频率设置为 50 MHz, D/AC 模块的采样频率设置为 100 MHz, FPGA 工作频率为 50 MHz。因此, 根据公式(2), 每含有一位符号信息的信号经特征提取后具有 51 维数据。

能量传输方面, 本文实验对不同负载在不同距离下的能量传输和无线携能传输的功率接收情况进行记录。在实验过程中, 保持了功率放大器的输入功率不变, 表 1 记录了在没有任何阻抗匹配优化下陆地实验和水下实验的功率损失。从结果可以看出, 本文方案在解调通道上并没有占用过多的有效功率, 而且通用性很强。实验中利用不同的电阻和设备模拟超低功耗(LED)、普通电子产品(手机)和一些阻值较大的设备, 实验数据表明, 本方案能适应不同的负载。

数据传输方面, 系统的 SVM 算法分类器由 Python 3.0 实现。本实验分别对线性内核、多项式内核和高斯径向基(Radial Basis Function, RBF)内核 3 个 SVM 内核函数进行以误码率作为评判的解码性能比较^[24]。本实验先使用 100 位数据进行在线训练, 并更改 Tx 和 Rx 线圈之间的距离。误码率(BER)结果如图 10 所示, 其中多项式内核函数的性能优于其他两个函数, 尤其是当度数(Degree)参数设置为 2 时。

此外, 本实验还评估度数(Degree)参数对系统性能的影响。其中, 度数参数是多项式内核函数中最主要的参量, 是多项式的幂。在本实验

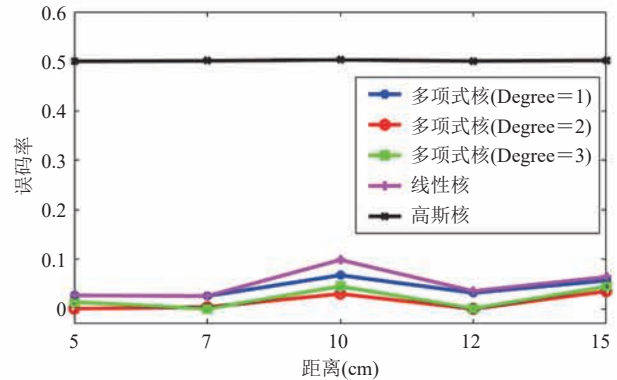


图 10 不同核函数的误码率

Fig. 10 BERs of different kernel functions

中, 通过调整不同数量的训练样本进行评估。图 11 为具有不同程度参数的误码率。

除距离变化外, 线圈未对准也会导致通道产生变化, 加大解调难度。但本系统的解调是基于机器学习的解调算法, 通过特征工程, 在此种复杂情况下的解码也有较高的准确率。在本实验中, 将 Tx 和 Rx 线圈之间的垂直距离保持在

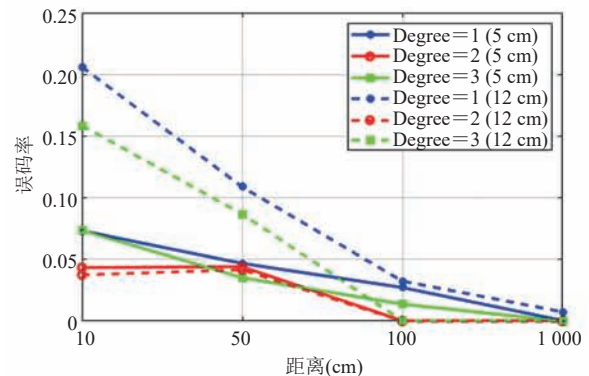


图 11 不同多项式内核参数的误码率

Fig. 11 BERs of different polynomial kernel parameters

表 1 水下实验功率损失

Table 1 Underwater power loss

距离	负载功率损失 (mW)											
	LED			手机			10 Ω			40 Ω		
	数能同传	能量传输	功率损耗	数能同传	能量传输	功率损耗	数能同传	能量传输	功率损耗	数能同传	能量传输	功率损耗
4 cm	300.564	329.359	28.795	435.232	575.344	140.112	29.700	40.446	10.746	277.884	395.412	117.528
6 cm	153.114	199.675	46.561	208.380	215.760	7.380	90.630	112.875	22.245	103.222	105.672	2.450
8 cm	124.096	150.088	25.992	129.162	159.357	30.195	30.800	46.431	15.631	75.255	97.909	22.654
10 cm	17.434	16.614	-0.820	17.120	21.648	4.528	8.2076	3.9004	-4.3072	15.879	11.832	-4.047

10 cm, 并调整水平距离。训练集的位数从 50 位调整为 1 000 位。如图 12 所示, 当训练比特大于 50 时, 误码率可以达到 5% 以下, 并随着更多的训练比特而接近 0。

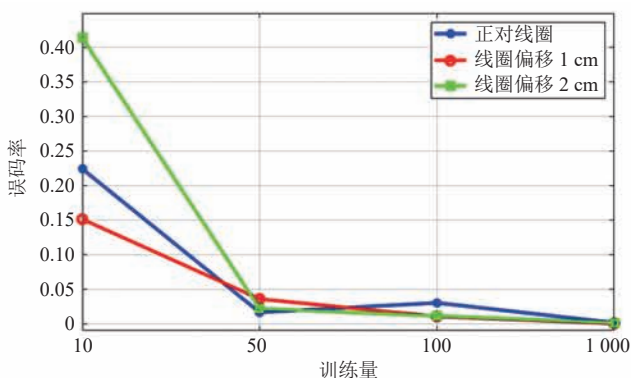


图 12 不同偏移距离下的误码率

Fig. 12 BERs under different offset distance

5 讨论与分析

现有的分离式携能信息传输系统存在两种不同功能的线圈, 可以看作是两个子系统, 线圈间的相互干扰变得更为复杂, 使得阻抗匹配更难分析。耦合线圈具有固定谐振频率, 在不同的距离下或不同频率的信号都会导致频率分裂, 即频率谐振点发生偏移, 信号发生非线性失真。传统解调方法的效果比较差, 在滤波的过程中无法获取正常波形的幅度和频率, 导致解码错误, 且在高比特率的通讯中的影响尤为严重。

现有的 SWIPT 研究中, 利用机器学习方法进行信息分类来解调的研究仍相对较少, 更多的重点在于优化综合式机制下的时间切换模式和功率分割模式下的能效和可达率等。使用“无线携能传输 (SWIPT)、机器学习 (Machine Learning) 和解调 (Modulation/Coding)”等关键词在 IEEE 数据库检索可知, 相关较新的文献为利用机器学习、深度学习和神经网络等算法计算最优的功分因子 α 、时分因子 β 和发射功率, 优化计算时间和提高系统能效; 使用 k -means 和 k -medoids 算

法, 根据接收设备位置建模用于聚类的目标函数并仿真得出最优功率分配方法^[25-26]; 使用深度学习技术代替传统计算方法, 得到功率分配和时间切换问题的最优近似解并提出一种资源管理策略^[27-28], 或基于强化学习达到自适应速率和能量收集间隔控制和中继的选择, 最大限度提高吞吐量^[29-32]; 也有利用深度学习分析 SWIPT 被窃听者拦截的概率, 并优化通讯的保密性^[33]。

但在上述的研究与仿真结果中, 发射端在产生信号前都需要大量的计算, 接收端也需要根据算法不断地调整进行切换选择。还有一些研究利用深度学习递归神经网络决定通信模式^[34]。本研究提出一种可以适用于水下较远距离的、基于磁共振耦合无线携能传输系统, 重点把机器学习应用到信息解调, 注重接收端获取的信号, 并不需要在发射端设计算法和控制, 这是一种相对较新的尝试。通过结合 FPGA 的高速处理能力和机器学习实现水下磁耦合携能信号传输的系统, 联合方式的传输可以通过减少耦合线圈之间因互感而产生的阻抗问题, 同时在机器学习的支持下, 通过对接收信号进行特征工程并分类, 不仅减轻了系统电路的复杂度, 还提升了解调的准确率。

基于磁耦合的水下无线携能通信具有传输距离远、穿透性强和稳定性高的特点^[35], 对海洋环境监测以及探索有一定的优势与帮助。具体地, 能解决水下设备电源的问题, 不需要频繁地上浮或工程师下潜更换电池^[36-37]。

6 结论与展望

本文提出一种可用于水下的基于磁共振的无线携能通信系统并开发了一个原型机, 其中传输数据速率达到 1 Mbps。不需要电路上的改进控制, 使得在信号传输的同时, 进行能量与数据的低损耗传输。接收端只需把携能信号采集起来并进行数据段分割, 通过引入了基于 SVM 的在线

训练和解码方案, 该系统可以在频率变化和选择性信道中实现高可靠性解码。实验结果表明, 采用 100 个符号进行实时训练获得的 SVM 模型, 误码率几乎接近 0。表明该系统用于水下设备提供远距离高效率的能量供给以及高速稳定的数据传输的可行性。

目前已知的无线携能传输技术中, 关于信息解码的研究都侧重于电路上和信号上的改进。信息解调其实可以转化为信号分类问题, 尤其是二进制调制的信号。本研究表明机器学习可以为未来无线携能通讯提供一个可靠的技术方案。但为进一步优化设计方法, 后续还应该结合一些电路、材料、算法进行改进。

参 考 文 献

- [1] Jr Ewachiw MA. Design of an autonomous underwater vehicle (AUV) charging system for underway, underwater recharging [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [2] 刘浩洋. 磁耦合谐振水下无线能量与信息同步传输关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Liu HY. Research on key technologies of underwater simultaneous wireless information and power transmission in magnetic resonance coupling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [3] Kesler M, McCarthy C. Highly resonant wireless power transfer in subsea applications [R]. WiTricity Corporation White Paper, 2016: 1-9.
- [4] Shizuno K, Yoshida S, Tanomura M, et al. Long distance high-efficient underwater wireless charging system using dielectric-assist antenna [C] // 2014 Oceans-St. John's, 2014.
- [5] Santos HM, Pereira MR, Pessoa LM, et al. Assessment of design trade-offs for wireless power transfer on seawater [C] // Oceans 2016 MTS/IEEE Monterey, 2016: 1-7.
- [6] 张克涵, 陈婉荣, 文海兵. AUV 非接触式数据传输技术的研究 [J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(6): 58-61.
- Zhang KH, Chen WR, Wen HB. Research on non-contact data transmission technology of AUV [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(6): 58-61.
- [7] 聂志强, 王世练, 邓恬. 基于 OFDM 的水下短距离超宽带电磁波通信方法 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37(8): 70-74, 144.
Nie ZQ, Wang SL, Deng T. A method of short distance and ultra-wideband underwater electromagnetic communication based on OFDM [J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(8): 70-74, 144.
- [8] Pompili D, Akyildiz IF. Overview of networking protocols for underwater wireless communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1): 97-102.
- [9] Kaushal H, Kaddoum G. Underwater optical wireless communication [J]. IEEE Access, 2016, 4: 1518-1547.
- [10] Zoksimovski A, Sexton D, Stojanovic M, et al. Underwater electromagnetic communications using conduction-channel characterization [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 34: 42-51.
- [11] Zhang Z, Pang HL, Georgiadis A, et al. Wireless power transfer—an overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1044-1058.
- [12] Yilmaz G, Dehollain C. Wireless power transfer [M] // Wireless Power Transfer and Data Communication for Neural Implants, 2017: 23-55.
- [13] Kumar P, ur Rehman MR, Ali I, et al. FSK modulation technique for SWIPT system in LabVIEW modeling [C] // 2020 35th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), 2020: 326-329.
- [14] Ur Rehman MR, Zadeh HA, Ali I, et al. LabVIEW based modeling of SWIPT system using BPSK modulation [C] // 2018 International Conference

- on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), 2018: 1-4.
- [15] Ur Rehman MR, Oh SJ, Ali I, et al. Modeling of SWIPT system with ASK modulation in LabVIEW [C] // 2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), 2019: 1-4.
- [16] Noeren J, Heinrich J, Böttigheimer M, et al. A high frequency data transmission method for contactless energy transfer systems [C] // 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2018: 1-4.
- [17] Maier M, Maier D, Zimmer M, et al. A novel self-oscillating power electronics for contactless energy transfer and frequency shift keying modulation [C] // 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016: 67-72.
- [18] Lee C, Jang G, Cho S. Energy-efficient adaptive directional queue-stable stochastic scheduling for SWIPT in NOMA [C] // 2020 International Conference on Information Networking (ICOIN), 2020: 76-79.
- [19] Zhou X, Zhang R, Ho CK. Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(11): 4754-4767.
- [20] Liu L, Zhang R, Chua KC. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 12(1): 288-300.
- [21] Jang HH, Choi KW, Kim DI. Novel frequency-splitting SWIPT for overcoming amplifier nonlinearity [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 826-829.
- [22] Narayanamoorthi R, Vimala Juliet AV, Santhoshkumar G, et al. Frequency split elimination of short range wireless power transfer system by active matching tuning circuit [J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2016, 9(42), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i42/101842.
- [23] 顾亚祥, 丁世飞. 支持向量机研究进展 [J]. *计算机科学*, 2011, 38(2): 14-17.
- Gu YX, Ding SF. Advances of support vector machines (SVM) [J]. *Computer Science*, 2011, 38(2): 14-17.
- [24] 奉国和. SVM 分类核函数及参数选择比较 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(3): 123-124.
- Feng GH. Parameter optimizing for support vector machines classification [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(3): 123-124.
- [25] Cui JJ, Khan MB, Deng YS, et al. Unsupervised learning approaches for user clustering in NOMA enabled aerial SWIPT networks [C] // 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2019: 1-5.
- [26] Luo JC, Tang J, So DKC, et al. A deep learning-based approach to power minimization in multi-carrier NOMA with SWIPT [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 1-1.
- [27] Lee K, Lee W. Learning-based resource management for SWIPT [J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(4): 4750-4753.
- [28] Lin R, Zhao YF, Tian L, et al. Deep learning based resource allocation in NOMA wireless power transfer networks [C] // 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2019: 2098-2103.
- [29] Guo DL, Tang L, Zhang XG. Optimal energy allocation and multiuser scheduling in SWIPT systems with hybrid power supply [C] // 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2019: 1-6.
- [30] Chun CJ, Kang JM, Kim IM. Adaptive rate and energy harvesting interval control based on reinforcement learning for SWIPT [J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(12): 2571-2574.
- [31] Zhang Z, Lu YM, Huang YZ, et al. Neural network-based relay selection in two-way SWIPT-enabled cognitive radio networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 99(6): 6264-6274.

- [32] Guo DL, Tang L, Zhang XG. Joint energy allocation and multiuser scheduling in SWIPT systems with energy harvesting [J]. *IET Communications*, 2020, 14(6): 956-966.
- [33] Jameel F, Khan WU, Chang Z, et al. Secrecy analysis and learning-based optimization of cooperative NOMA SWIPT systems [J]. 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2019: 1-6.
- [34] Park JJ, Moon JH, Lee KY, et al. Mixed-time scale based adaptive mode switching for dual mode SWIPT [C] // 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2019: 228-231.
- [35] 牛王强. 水下无线电能传输研究进展 [J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2017, 9(1): 46-53.
- Niu WQ. The state of the art of underwater wireless power transfer [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 9(1): 46-53.
- [36] 张克涵, 阎龙斌, 闫争超, 等. 基于磁共振的水下非接触式电能传输系统建模与损耗分析 [J]. *物理学报*, 2016, 65(4): 334-342.
- Zhang KH, Yan LB, Yan ZC, et al. Modeling and analysis of eddy-current loss of underwater contactless power transmission system based on magnetic coupled resonance [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(4): 334-342.
- [37] 刘敬彪, 陈贻想, 于海滨. 基于电磁耦合的水下无线能量传输系统 [J]. *电子技术应用*, 2010, 36(9): 90-92.
- Liu JB, Chen YX, Yu HB. Underwater wireless energy transmission system based on electromagnetic coupling [J]. *Application of Electronic Technique*, 2010, 36(9): 90-92.