

# 坐标归零的正交频分复用带内全双工水声通信方法

陆胤亨<sup>1</sup>, 吴颂文<sup>2,3,4,5</sup>, 刘媛<sup>1</sup>, 王方勇<sup>1</sup>, 周锋<sup>3,4,5,2</sup>

(1. 汉江国家实验室, 湖北 武汉 430060; 2. 哈尔滨工程大学 三亚南海创新发展基地, 海南 三亚 572024; 3. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 4. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨 150001; 5. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对水声通信中频谱资源缺陷问题, 本文面向全双工水下通信体制, 提出了一种基于坐标归零的正交频分复用通信方法。该方法从水声通信编码角度对本地自干扰进行了有效抑制, 并通过仿真和水池实验进行了验证。水池实验结果表明: 在-45 dB的信干比下, 算法可在带内实现远端信号的精确提取, 误码率降至 $10^{-3}$ 。该方法可与多种干扰抵消方法进行有效融合, 形成新型多域联合自干扰抵消方法, 进一步突破自干扰抵消上限, 为带内全双工水声通信工程应用提供了有利的技术支持。

**关键词:**水声通信; 全双工通信; 自干扰抵消; 通信编码; 坐标归零; 正交频分复用; 强功率干扰; 多域联合

**DOI:** 10.11990/jheu.202506034

**网络出版地址:** <https://link.cnki.net/urlid/23.1390.u.20250703.1002.002>

**中图分类号:** TN929.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2025)08-1685-08

## In-band full-duplex underwater acoustic communication method using orthogonal frequency-division multiplexing based on coordinate zeroing

LU Yinheng<sup>1</sup>, WU Songwen<sup>2,3,4,5</sup>, LIU Yuan<sup>1</sup>, WANG Fangyong<sup>1</sup>, ZHOU Feng<sup>3,4,5,2</sup>

(1. Hanjiang National Laboratory, Wuhan 430060, China; 2. Sanya Nanhai Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Sanya 572024, China; 3. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 4. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China; 5. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** This paper addresses the problem of spectrum resource defects in underwater acoustic communication. To this end, an orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) communication method based on coordinate zeroing for a full-duplex underwater communication system is proposed. This method effectively suppresses local self-interference from the perspective of underwater acoustic communication coding. The algorithm was verified by simulation and pool experiments. The pool experiments showed that for a signal-to-interference ratio of -45 dB, the algorithm accurately extracted the far-end signal in the band, and the bit error rate decreased to  $10^{-3}$ . Moreover, this method can be effectively integrated with various interference cancellation methods to form a new multidomain joint self-interference cancellation method. This new method further breaks through the upper limit of self-interference cancellation and provides favorable technical support for in-band full-duplex underwater acoustic communication engineering applications.

**Keywords:** underwater acoustic communication; full-duplex communication; self-interference cancellation; communication coding; coordinate zeroing; orthogonal frequency division multiplexing; strong power interference; multi-domain association

水声通信在海洋信息领域扮演着重要角色, 是唯一实现远距离稳定信息传输的有效手段<sup>[1-3]</sup>。然而, 水下通信系统面临带宽有限、传播损失严重、受多普勒效应影响及时变性等问题, 导致系统性能大

幅降低, 信息吞吐量显著下降。因此, 如何提高水声信道的频带利用率和信息吞吐量成为关键问题。带内全双工水声通信技术<sup>[4-6]</sup>由于可实现双向同时同频收发, 具有很高的频带利用率, 近年来被广泛应用于水声通信领域。该技术的核心问题是如何有效完成自干扰抵消<sup>[7]</sup>。目前, 研究者们已在空间域、模拟域和数字域实现了多种自干扰抵消方案。文献[8]提出了基于凸优化理论的波束形成器, 通过

收稿日期: 2025-06-16. 网络出版日期: 2025-07-03.  
基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(JQ2023A004).  
作者简介: 陆胤亨, 男, 工程师;  
刘媛, 女, 工程师.  
通信作者: 刘媛, E-mail: yliu\_23@163.com.

空域滤波抑制自干扰信号并增强期望信号,实验验证了该方法的实用性与抵消效果。Wang 等<sup>[9]</sup>于 2019 年提出了基于双换能器的主动取消宽带自干扰方法,通过 Waymark 水声 (underwater acoustic, UWA) 模拟器验证,该方法有效减少了均方误差与比特错误率,提升了全双工水声通信 (full-duplex underwater acoustic communication, FD-UWAC) 系统性能。文献[10]提出了结合水声矢量传感器与相控阵换能器的集成设计以实现空间自干扰抵消 (self-interference cancellation, SIC),实验表明其可使载频 80 kHz、声学矢量传感器 (acoustic vector sensor, AVS) 转向角为 $-5^\circ$ 的 BPSK 信号实现 59 dB 的自干扰抵消。Towliat 等<sup>[11]</sup>提出了结合自适应决策反馈均衡器 (adaptive decision feedback equalizer and self-interference cancellation, ADFE-SIC) 方法,通过递归最小二乘算法同时抵消自干扰和符号间干扰,实验结果显示其性能优于传统分开均衡方法。Wei 等<sup>[12]</sup>提出了增强型特征分量关联方法,用于拖曳线性阵列的近场干扰抑制,即使在信干噪比低至 $-25$  dB 的情况下,也能实现数十分贝的处理增益,显著优于传统多重信号分类干扰抑制 (multiple signal classification interference suppression, MUSIC-IS) 方法。Shen 等<sup>[5]</sup>提出了由单发射换能器及双水听器组成的两阶段 SIC 方案,通过递归最小二乘算法 (recursive least squares, RLS) 算法和坐标下降 (dichotomous coordinate descent, DCD) 迭代技术,在水箱实验中一二阶段分别抵消约 60 dB 和 3 dB 的自干扰信号,湖试中分别抵消约 35 dB 和 6.5 dB。同时,还提出了一种用于 FD-UWA 系统的低复杂度数字 SIC<sup>[13]</sup>,通过 DCD-RLS 自适应滤波器重构 SI 信号,水箱实验验证可获得 69 dB 的自干扰抵消效果。考虑到实际应用情境,Qiao 等<sup>[14]</sup>针对收发信号存在非交叠区域的情况,提出了适用于异步全双工通信系统的数字自干扰抵消算法,利用非交叠区域采集非线性失真分量并结合稀疏自适应信道估计算法进行抵消。Zhang 等<sup>[15]</sup>则针对高流量要求的水下应用场景,提出了基于多通道全双工通信技术的水下数据传输方法,采用水下正交频分多址技术和静态路由策略,实现稳定的全双工通信。

上述研究大多通过设计通信协议或采用空间域、模拟域或数字域等技术来实现自干扰抵消。然而,水声信道具有时空不确定性,节点位置对网络信道的接入影响不可忽视。传统无线电领域方法(如天线极化、天线正交等)不再适用,空间域自干扰抵消性能有限,受限于当前环境影响;模拟域自干扰抵消技术多为电路仿真、软件仿真等,缺少基于实物的方案与硬件系统联调设计;数字域干扰抵消技术尚

未有效解决硬件设备非线性失真问题以及远端期望信号存在时系统抵消能力受限问题。因此,探索新型自干扰抑制方法,提高系统总体自干扰抵消上限成为亟待解决的问题。

在水下组网领域,码分多址 (code division multiple access, CDMA) 技术常被用于多用户干扰抑制,其利用伪随机码的正交性分离信号<sup>[16]</sup>。针对扩频水声通信系统在多径传播环境中的同信道干扰问题,研究人员提出了基于坐标归零的超空间消除干扰抑制方法<sup>[17]</sup>。Yang<sup>[18]</sup>通过将超空间坐标归零技术 (hyperspace cancellation by coordinate zeroing, HCC0) 作为分组数据处理的前端干扰抑制模块,改进了该方法,有效抑制了强信号对弱信号的遮蔽效应,并缓解了扩频通信中因近远效应导致的系统性能下降问题。Wu<sup>[19]</sup>将基于坐标归零的超空间消除方法应用于码移键控 (code shift keying, CSK) 调制的全双工 (full duplex, FD) 扩频通信系统,并通过仿真验证了其在全双工场景下的可行性。然而,该研究中的系统信干比 (signal-to-interference ratio, SIR) 较高,且 HCC0 的 SIC 性能尚未得到定量分析。

本文提出了一种基于坐标归零法的正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 全双工水声通信方法,该通信方法能够利用其自相关特性,从传输信息的码域角度完成自干扰抑制,为水声全双工通信场景提供了解决方案。此外,所提出的通信方法可与传统方案在 FD-UWAC 系统中联合使用,在现有技术基础上提高自干扰抵消上限,突破原有自干扰抵消性能。

## 1 系统模型

### 1.1 全双工通信系统模型

图 1 为基于坐标归零法的 OFDM 全双工水声通信模型,近端接收端同时接收到远端和近端发射的数据。接收信号可以表示为:

$$y(t) = s_1(t) * h_1(t) + s_2(t) * h_2(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: \* 代表信号之间的卷积;  $s_1$ 、 $s_2$  分别代表远端和近端发射的信号;  $h_1$ 、 $h_2$  分别代表远端和近端信号经历的信道;  $n(t)$  表示接收到的噪声信号。  $s_1$ 、 $s_2$  分别可以表示为:

$$s_1(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k \in \mathcal{R}} X_1[l, k] e^{j2\pi k \Delta / (t - lT_{\text{sym}})} g(t), \quad -T_{\text{cp}} \leq t - lT_{\text{sym}} < T_u \quad (2)$$

$$s_2(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k \in \mathcal{R}} X_2[l, k] e^{j2\pi k \Delta / (t - lT_{\text{sym}})} g(t), \quad -T_{\text{cp}} \leq t - lT_{\text{sym}} < T_u \quad (3)$$

式中:  $L$  为发射 OFDM 符号数目;  $\mathcal{R}$  为有效子载波

集合;  $T_u$  为去前缀后的有效符号时长;  $T_{cp}$  为循环前缀长度;  $T_{sym} = T_u + T_{cp}$  为完整符号时长;  $X_1[l, k]$ 、 $X_2[l, k]$  分别为远端和近端在第 1 个 OFDM 符号、索引为  $k$  的有效子载波上调制的复符号;  $\Delta f$  为子载

波间隔。值得注意的是,  $s_2$  发射的信号信息即  $X_2$  采用的  $m$  序列循环。  $g(t)$  是脉冲成型滤波器。这种方式虽然会降低近端发射信号的通信速率,但是可以将此直接作为指令信息进行传输。

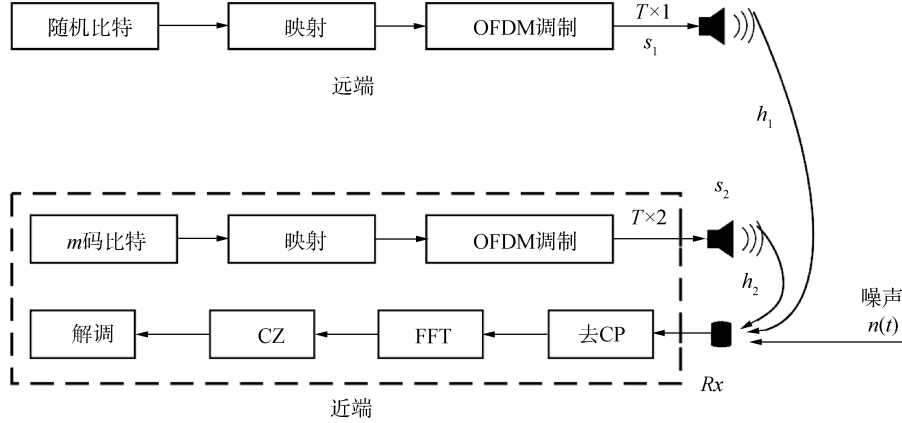


图 1 基于坐标归零法的 OFDM 全双工水声通信模型

Fig. 1 OFDM full-duplex code domain self-interference cancellation model

### 1.2 码域坐标归零算法

通过对接收到的信号进行 DFT 处理,得到:

$$Y[k] = H_1[k]X_1[k] + H_2[k]X_2[k] + N[k] \quad (4)$$

式中:  $H_1$  和  $H_2$  为远端和近端信号经历信道的离散傅里叶变换,  $H_{(\cdot)} = \text{DFT}\{h_{(\cdot)}\}$ ,  $N[k] = \text{DFT}\{n\}$ , 把有效子载波堆成列向量:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}_1 \odot \mathbf{X}_1 + \mathbf{H}_2 \odot \mathbf{X}_2 + \mathbf{N} \quad (5)$$

式中:  $\odot$  表示为 Hadamard 逐元素乘。

将近端发射序列分段后通过循环卷积映射到投影空间,以发射信息中包含完整  $m$  序列的一段数据为例,假设  $m$  序列长度为  $R$ ,循环矩阵为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & \cdots & m_{R-1} \\ m_{R-1} & m_0 & \cdots & m_{R-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_1 & m_2 & \cdots & m_0 \end{bmatrix}$$

随后,将接收向量  $\mathbf{Y}$  投影到  $\mathbf{M}$  所在的子空间,得到  $r$ :

$$r = \mathbf{M} \cdot \mathbf{Y} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_1 \odot \mathbf{X}_1 + \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}_2 \odot \mathbf{X}_2 + \mathbf{M} \cdot \mathbf{N} \quad (6)$$

由于  $\mathbf{X}_2$  中信息与  $m$  序列相关性较强,对所得相关累积量先进行峰值抑制:

$$r_i = \begin{cases} r_i, & |x_i(l)| < \eta \\ 0, & |x_i(l)| \geq \eta \end{cases} \quad (7)$$

其中,对于阈值  $\eta$  的取值需要满足:

$$\eta \geq \max(s_1(t) \cdot \rho \cdot h_1(t)) \approx \max(|X_1[k]|^2) \max(\rho) \quad (8)$$

式中  $\rho$  表示近端和远端发射信息的互相关函数。判决后,先对相关结果执行去均值处理,以消除直流分

量;然后再做逆映射,最终恢复出原始信息序列:

$$y_{\text{last}} = \mathbf{M}^{-1} \cdot r \quad (9)$$

## 2 仿真实验

基带信号的采样率设为 48 kHz,信号频带为 6.05~10 kHz,子载波间隔 46.875 Hz,其中 84 条有效子载波通过 BPSK 调制,循环前缀长度为 128 个采样点。在仿真中,将信干比 (signal-to-interference ratio, SIR) 设置为 -40 dB,分别考虑无远端信号与存在远端信号 2 种场景。对 2 种场景均应用码域坐标归零 (coordinate zeroing, CZ) 算法,并对比算法处理前后的时域数据和频谱能量变化,以此验证本文所提通信方法在带内全双工水声通信中的有效性。

### 2.1 无远端信号时自干扰抵消性能

如图 2 所示,本文提出的方法能够显著抑制带内自干扰信号,整体自干扰能量大幅下降,这为后续存在远端信号时的自干扰抵消过程奠定基础。

图 3 对比了无远端信号情况下,算法处理前后的自干扰频谱能量对比,信号带内功率由约 -20 dB 降至 -70 dB 附近,实现了近 50 dB 的抑制效果。该结果与信号时频图的变化相互印证,进一步证明在无远端信号的场景下,坐标归零算法不仅能够有效抑制带内自干扰,也可抵制带外的干扰。

### 2.2 存在远端信号时自干扰抵消性能

由图 4 和图 5 可知,通过对比坐标归零处理前后的信号,可以观察到处理后的信号在时域上与远端信号理论时域波形更加接近,时频图中的干扰能量成分明显减少,说明坐标归零技术有效抑制了远端信号带来的干扰。

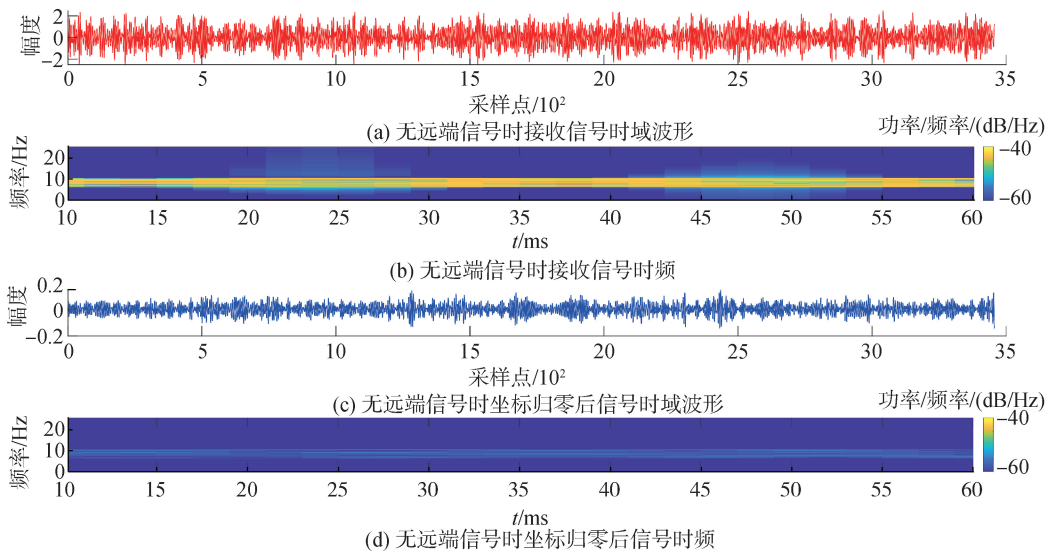


图 2 无远端信号时坐标归零处理前后信号时域波形与时频

Fig. 2 Signal time-domain waveforms and time-frequency diagrams before and after coordinate zeroing without far-end signal

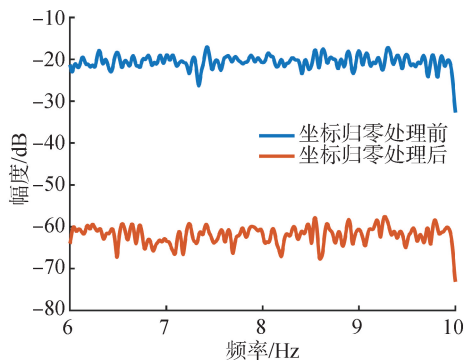


图 3 无远端信号时坐标归零处理前后频谱

Fig. 3 Spectrum before and after coordinate zeroing without far-end signal

图 6 为经过坐标归零处理后的解调信息与半双工体制下的远端通信信号解调信息的对比。由图 6 可知,坐标归零后的解调信息与远端实际发射信系基本接近,能够正确地解调。说明经过坐标归零处理后,近端干扰得到了有效抑制。

图 7 为存在近端信号干扰时,经过坐标归零处理前后的频谱对比。从频谱图中可以看出,经过坐标归零处理后,处理后干扰信号的能量显著降低,达

到近 40 dB 的干扰抑制效果,处理后的能量接近于半双工体制理论值。

图 8 为仿真实验中直接对接收信号解调与经过坐标归零后信号解调的误码率曲线。经过坐标归零处理后,相同信干比下误码率明显降低,在信干比为 -40 dB 的情况下,误码率小于  $10^{-4}$ 。相比于传统方法,本方法获得了更好的误码率性能。

### 3 水池实验验证

为验证所提出码域坐标归零算法的有效性,本文通过水池实验模拟全双工通信过程,在有远端信号情况下进行验证。水池实验中,发射信号频带采用 6.05~10 kHz,子载波间隔 46.875 Hz,将 SIR 设置为 -45 dB。水池布置示意图及现场布置示意图如图 9 和图 10 所示。水池长度 5 m,深度 5 m,近端与远端的发射换能器和接收水听器布置在水深 2 m 处。近端发射换能器与接收水听器之间距离 0.5 m,远端发射换能器与接收水听器之间距离 3 m,远端发射换能器采用最小功率发射,以模拟远距离通信的效果。

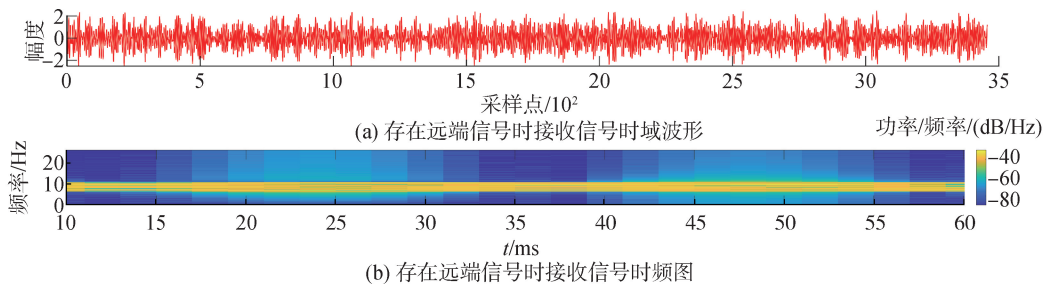


图 4 存在远端信号时接收信号时域波形与时频图

Fig. 4 Time-domain waveform and time-frequency diagram of the received signal with far-end signal

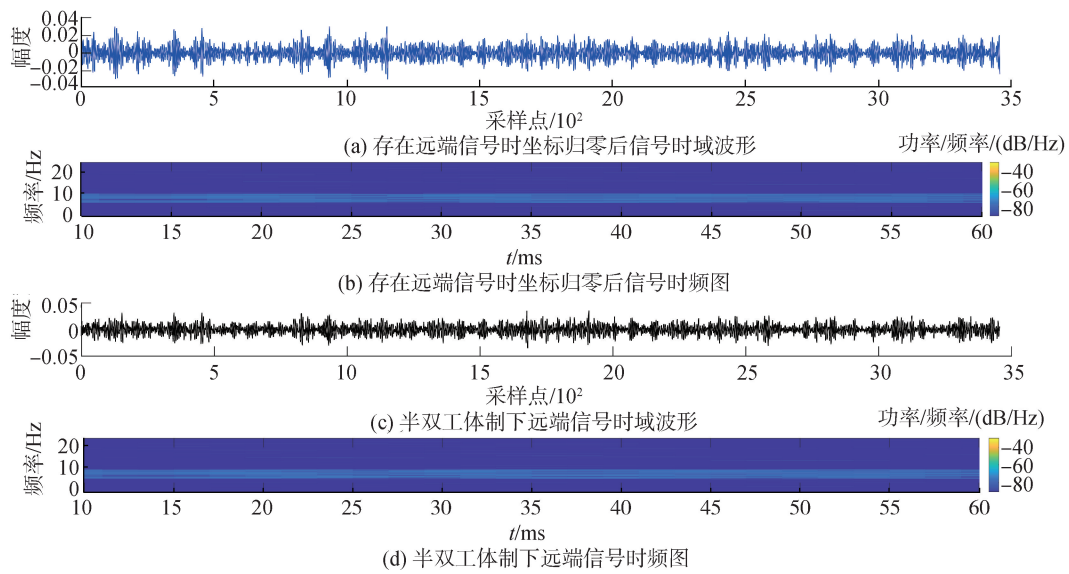


图 5 坐标归零处理后与半双工体制下的理论时域波形与时频图对比

Fig. 5 Time-domain and time-frequency comparison: coordinate zeroing processed signal and theoretical half-duplex signal

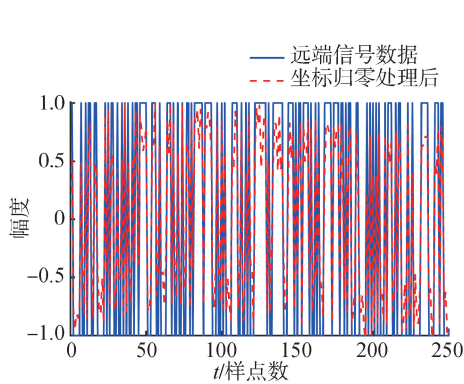


图 6 远端信号与坐标归零处理后信息时域对比

Fig. 6 Time domain comparison of far-end signal and information after coordinate zeroing

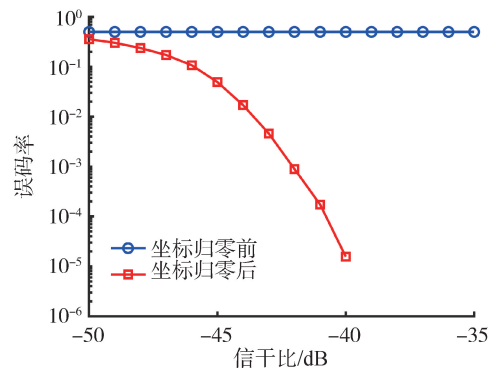


图 8 存在远端信号时坐标归零前后误码率曲线

Fig. 8 The bit error rate before and after coordinate zeroing with far-end signal

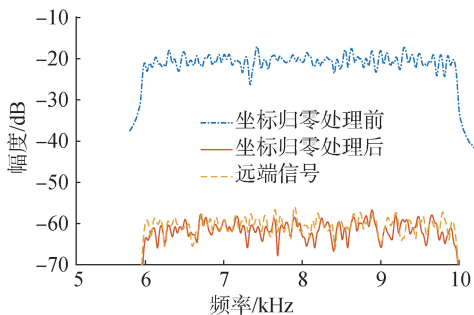


图 7 存在远端信号时自干扰抵消频谱

Fig. 7 Self-interference cancellation spectrum with far-end signal

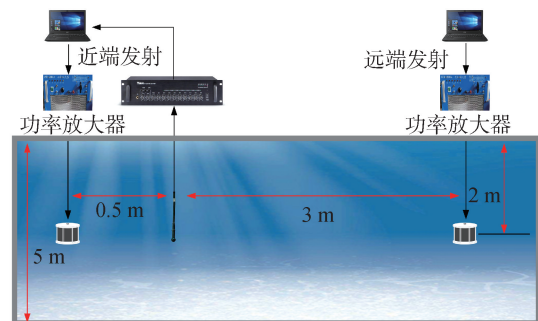


图 9 水池实验设备布置示意

Fig. 9 Layout diagram of pool experimental equipment

图 11 为水池全双工实验中经过不同处理方法后的信号时域波形及时频谱。由图 11(a)和图 11(b)可以看出本地干扰信号能量较大。

如图 11(c)~(f)可以看出经过上述 2 种方法,干扰信号得到抑制,但是干扰信号的能量依旧比较强。因此本文在水池实验中应用传统的自干扰抵消方法与本文所提方法相结合,如图 11(g)~(j)所示,大大降低干扰能量,抵消后的信号时域与时频图

与半双工体制下的理论值接近。综上所述,本文提出的通信方法与其他自干扰抵消方法,具有融合的可行性,融合后能够进一步提高自干扰抵消效果。

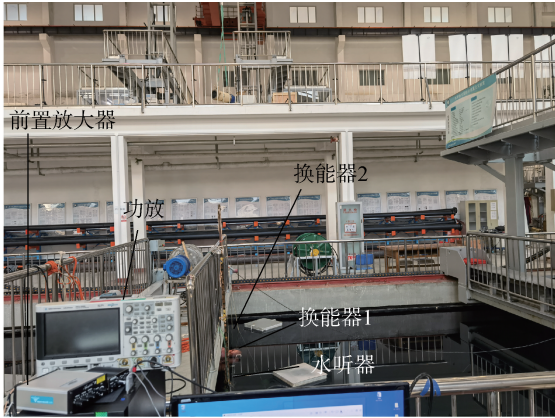
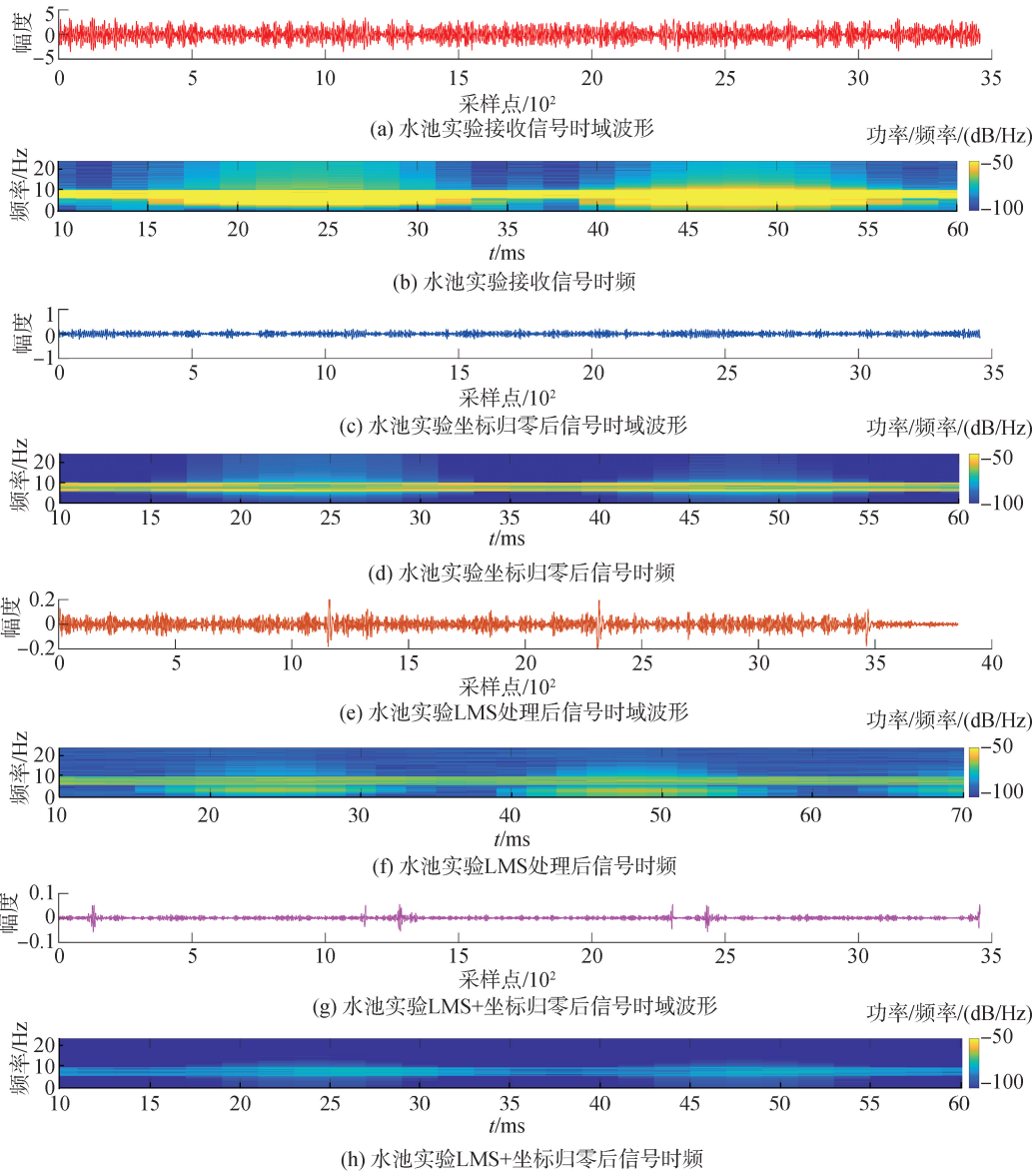


图 10 水池现场布置

Fig. 10 Pool site layout diagram

图 12 为水池实验中不同方法的自干扰抵消效果。从结果来看,坐标归零和 LMS 处理均能有效抑

制自干扰信号,但是 2 种方法抵消效果有限,而将传统方法和坐标归零结合后,能够将自干扰基本消除,且接近于半双工体制下的理论值。通过对照不同的信噪比,发现在信干比大于  $-30$  dB 的条件下,坐标归零处理后信号误码率小于  $10^{-4}$ 。通过对接收到的信号进行解调,发现在  $-45$  dB 的信干比下,对接收的信号直接解调,无法提取有效信息。经过 LMS 处理后的信号误码率约  $0.1$ ,经过坐标归零处理后的信号误码率约  $0.1$ ,通过将 LMS 与坐标归零结合后,误码率降到了  $10^{-3}$  以下。LMS 算法作为经典的自干扰抵消算法,可以实时估计信道作为信道估计的结果。而坐标归零在高于限定的信干比下,几乎无错码。这 2 个方法一个作用在时域,一个作用在码域,将 LMS 算法作为预处理,坐标归零作为后处理,组合能够实现一定的效果。说明本文所提方法具有可行性及有效性,突破了全双工水声通信系统的自干扰抵消上限,为全双工水声通信工程实现提供理论与技术支持。



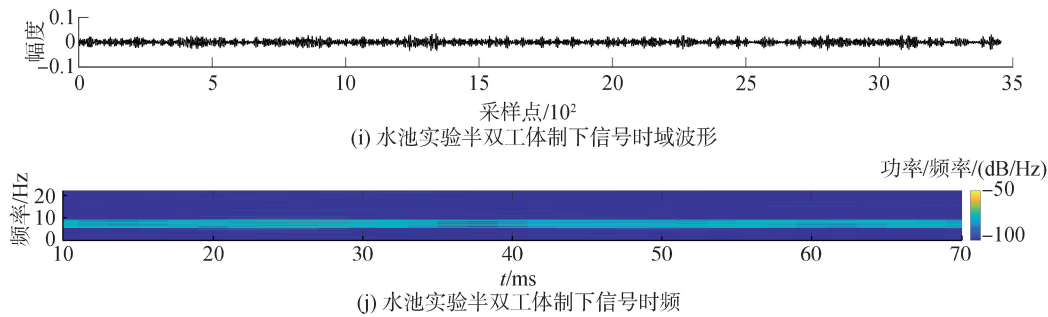


图 11 水池实验不同算法自干扰抵消时域与时频图对比

Fig. 11 Comparison of self-interference cancellation time domain and time-frequency diagram of different algorithms in pool experiment

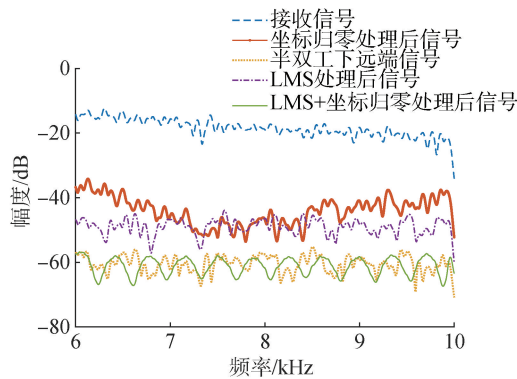


图 12 水池实验不同算法自干扰抵消效果对比

Fig. 12 Comparison of self-interference cancellation effects of different algorithms in pool experiments

## 4 结论

1) 本文提出的一种基于坐标归零的 OFDM 全双工水声通信方法,核心创新在于利用  $m$  序列的特性进行信息编码,从信号设计的源头上可以选择主动抑制本地自干扰信号,为解决水声 IBFD 中的强自干扰问题提供了一种思路。

2) 设计并实现了干扰抑制的关键处理流程,通过构造  $m$  序列的循环矩阵,并依次执行正交投影、阈值判决、去均值与逆映射操作,形成了一套完整的信号处理方案,能够有效地从混合信号中分离并消除强自干扰分量,最终准确恢复远端信息。

3) 通过仿真实验及水池实验验证验证了方法的优异干扰抵消性能与通信可靠性。仿真实验中所提方法实现了 40 dB 的自干扰抑制量,同时将通信误码率成功控制  $10^{-4}$  以下,显著提升了系统在强自干扰环境下的通信能力。水池实验中,将本方法与 LMS 自适应滤波算法结合应用,实验结果表明,即使在 -45 dB 的低 SIR 条件下,接收信号的能量被有效抑制至接近半双工体制的理论水平,同时通信误码率稳定维持在  $10^{-3}$  以下,充分证明了方法的实际有效性。

## 参考文献:

- [1] HAN Guangjie, JIANG Jinfang, SUN Ning, et al. Secure communication for underwater acoustic sensor networks [J]. IEEE communications magazine, 2015, 53(8): 54-60.
- [2] 童峰,周跃海,陈东升,等. 异构无人潜水器水声通信技术发展综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(11): 1963-1976.  
TONG Feng, ZHOU Yuehai, CHEN Dongsheng, et al. Advances and trends of underwater acoustic communication technology for heterogeneous unmanned underwater vehicles [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(11): 1963-1976.
- [3] 杨健敏,王佳惠,乔钢,等. 水声通信及网络技术综述[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(01): 1-21.  
YANG Jianmin, WANG Jiahui, QIAO Gang, et al. Review of underwater acoustic communication and network technology [J]. Journal of electronics & information technology, 2024, 46(01): 1-21.
- [4] LU Yinheng, QIAO Gang, YANG Chenlu, et al. A real-time digital self interference cancellation method for in-band full-duplex underwater acoustic communication based on improved VSS-LMS algorithm [J]. Remote sensing, 2022, 14(12): 2924.
- [5] SHEN Lu, HENSON B, ZAKHAROV Y, et al. Two-stage self-interference cancellation for full-duplex underwater acoustic systems [C]//OCEANS 2019-Marseille. Piscataway, 2019.
- [6] WU Songwen, ZHOU Feng, LU Yinheng, et al. Self-interference suppression of full-duplex spread spectrum underwater acoustic communication based on CSK modulation [C]//2024 OES China Ocean Acoustics (COA). Piscataway, NJ, 2024: 1-4.
- [7] 陆胤亨. 带内全双工水声通信多域联合自干扰抵消关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.  
LU Yinheng. Research on key technologies of multi-domain joint self-interference cancellation for in-band full-duplex underwater acoustic communication [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [8] 陆胤亨,赵云江,青昕,等. 带内全双工水声通信空间域自干扰抵消方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2022, 5(6): 494-501.  
LU Yinheng, ZHAO Yunjiang, QING Xin, et al. Spatial domain self-interference cancellation method of in-band

- full-duplex underwater acoustic communication[J]. Digital ocean & underwater warfare, 2022, 5(6): 494–501.
- [9] WANG Yanyan, LI Yingsong, SHEN Lu, et al. Acoustic-domain self-interference cancellation for full-duplex underwater acoustic communication systems[C]//2019 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). Piscataway, 2019: 1112–1116.
- [10] HSIEH Y T, QI Z, POMPILI D. Full-duplex underwater acoustic communications via self-interference cancellation in space[J]. Journal of communications and networks, 2023, 25(2): 167–181.
- [11] TOWLIAT M, GUO Zheng, CIMINI L J, et al. Joint equalization and self-interference cancellation for underwater acoustic in-band full-duplex communication[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2024, 49(2): 542–552.
- [12] WEI Kun, FANG Shiliang, TAO Jun. Enhanced near-field interference suppression scheme for the non-cooperative underwater acoustic pulse detection of the towed linear array[J]. Journal of marine science and engineering, 2022, 10(2): 250.
- [13] SHEN Lu, HENSON B, ZAKHAROV Y, et al. Digital self-interference cancellation for full-duplex underwater acoustic systems[J]. IEEE transactions on circuits and systems II: Express briefs, 2020, 67(1): 192–196.
- [14] QIAO Gang, GAN Shuwei, LIU Songzuo, et al. Digital self-interference cancellation for asynchronous in-band full-duplex underwater acoustic communication[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1700.
- [15] ZHANG Jie, YANG Guang, HAN Guangjie, et al. Space/frequency-division-based full-duplex data transmission method for multihop underwater acoustic communication networks[J]. IEEE internet of things journal, 2023, 10(2): 1654–1665.
- [16] AM A, GL A, SS B. Passive time reversal acoustics for horizontal shallow water acoustic communication to mitigate the effect of intersymbol interference-sciencedirect[J]. Applied acoustics, 2020, 27(11): 601–632.
- [17] HARRY D, ANDREW R. Eliminating clutter by coordinate zeroing[J]. The journal of the acoustical society of America, 2005, 117(4): 2494–2512.
- [18] YANG T C, YANG Wenbin. Interference suppression for code-division multiple-access communications in an underwater acoustic channel[J]. Journal of the acoustical society of America, 2009, 126(1): 220–228.
- [19] WU Songwen, ZHOU Feng, LU Yinheng, et al. Self-interference suppression of full-duplex spread spectrum underwater acoustic communication based on CSK modulation[C]//2024 OES China Ocean Acoustics (COA). Harbin, 2024: 1–4.

### 本文引用格式:

陆胤亨, 吴颂文, 刘媛, 等. 坐标归零的正交频分复用带内全双工水声通信方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(8): 1685–1692.

LU Yinheng, WU Songwen, LIU Yuan, et al. In-band full-duplex underwater acoustic communication method using orthogonal frequency-division multiplexing based on coordinate zeroing[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(8): 1685–1692.