

基于信道均衡技术的相干冰下声通信技术研究

唐胜雨*, 朱妍

中国海洋大学 信息科学与工程学部, 山东 青岛 266100

DOI: 10.61369/TACS.2025050040

摘要 : 针对冰区水声信道复杂的多途时延特性和严重的频率选择性衰落问题, 提出了基于多种信道均衡技术的相干冰下声通信方法。首先建立了冰区浅海波导传播模型, 分析了冰层对声传播的影响机理; 然后采用比例边界有限元方法对冰区波导传播特性进行数值计算, 设计了基于判决反馈均衡器的相干通信系统, 采用分数间隔均衡技术提高系统对信道时变特性的适应性。仿真实验采用 QPSK 调制方式, 验证了所提方法在复杂冰区环境下的通信性能。结果表明, 相比传统线性均衡器, 本文方法在信噪比为 5 dB 时误码率降低了一个数量级, 有效改善了冰下声通信的可靠性。

关键词 : 冰下水声通信; 信道均衡; 多途时延; QPSK 调制; 比例边界有限元

Research on Coherent Under-ice Acoustic Communication Technology Based on Channel Equalization Techniques

Tang Shengyu*, Zhu Yan

Faculty Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100

Abstract : To address the complex multipath delay characteristics and severe frequency-selective fading in under-ice acoustic channels, a coherent under-ice acoustic communication method based on multiple channel equalization techniques is proposed. First, a shallow water waveguide propagation model for ice-covered regions is established to analyze the influence mechanism of ice layers on acoustic propagation. Then, the scaled boundary finite element method is employed to numerically calculate the propagation characteristics of under-ice waveguides. A coherent communication system based on decision feedback equalizers is designed, utilizing fractional-spaced equalization techniques to improve system adaptability to time-varying channel characteristics. Simulation experiments using QPSK modulation validate the communication performance of the proposed method in complex ice-covered environments. Results demonstrate that compared to conventional linear equalizers, the proposed method reduces the bit error rate by one order of magnitude at 5 dB SNR, effectively improving the reliability of under-ice acoustic communication.

Keywords : under-ice acoustic communication; channel equalization; multipath delay; QPSK modulation; scaled boundary finite element

引言

随着全球气候变化和北极资源开发需求的增长, 冰区水声通信技术已成为海洋声学领域的重要研究方向。冰下无人潜航器的广泛应用为这些资源的勘探开发提供了重要手段, 然而冰层的存在使得传统的卫星通信和电磁波通信方式无法有效工作, 水声通信成为冰下设备与外界进行信息交换的唯一可靠途径^[1]。冰区水声信道环境呈现出显著的复杂性特征^[2], 使得冰区水声信道呈现出更强的时变特性和更复杂的多途结构。

国际上在冰区水声通信方面的研究起步相对较早。美国伍兹霍尔海洋研究所的 Freitag 等人在北冰洋开展了多次试验, 成功实现了 70–90 km 距离上 5–10 bps 的相干通信, 为冰下远程通信技术奠定了基础^[3]。相比之下, 国内在该领域的研究起步较晚但发展迅速。哈尔滨工程大学于 2015 年开展了国内首次冰下水声通信试验, 在松花江冰层下成功验证了多种通信技术的有效性^[4]。我国在第七次和第八次北极科考中也进行了相关技术验证, 分别在 1.26 km 距离上实现了 1.2 kbps 的通信速率^[5]。

尽管已有一定的研究基础, 但现有技术仍面临诸多挑战。传统的信道均衡技术主要针对开阔海域环境设计, 在面对冰区特有的强多途干扰和时变衰落性能受限。基于上述问题, 本文提出了基于多种信道均衡技术的相干冰下声通信方法。通过建立精确的冰区波导传播模型, 深入分析冰下多途时延特性, 设计了适应冰区条件的判决反馈均衡器, 并采用分数间隔均衡技术提高系统对信道时变特性的鲁棒性。

致谢

本工作受到中央高校基本科研业务费专项 (202413037) 支持。

一、冰区水声信道建模与传播特性分析

(一) 冰区浅海波导传播模型

在建立冰区波导模型时，需要准确描述各层介质的声学参数。水层声速分布呈现典型的上折射特性，这是由于极地海水的特殊温盐结构造成的。根据已有观测数据和声学理论，典型极地浅海区域的声速剖面可用以下经验公式表示：

$$c(z) = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S-35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}(S-35) - 7.139 \times 10^{-13}T^3D$$

其中 T 为温度 (°C)， S 为盐度， D 为深度 (m)。这一公式反映了极地海水在低温条件下的声速变化规律，特别是近表面的负梯度分布特征。

(二) 冰下信道特性分析

为了准确计算冰区波导的模态特征，本文采用比例边界有限元方法对冰水耦合系统进行数值分析。通过有限元离散化处理，可以将连续介质问题转化为离散的矩阵方程。耦合系统的广义特征值问题可表示为： $[K - \omega^2 M + H]\phi = 0$

其中 K 为刚度矩阵，反映介质的弹性特性； M 为质量矩阵，与介质密度相关； H 为耦合矩阵，体现了不同介质间的相互作用； ϕ 为模态函数向量； ω 为角频率。求解此广义特征值问题，可以获得冰区波导的本征模态和相应的传播常数。这些模态特征直接决定了声波在冰区环境中的传播规律，为后续的信道特性分析提供了理论基础。

二、基于信道均衡技术的相干通信方法

(一) 冰下水声信道统计特性

冰层的存在对多途传播产生了显著而复杂的影响。冰层厚度和表面粗糙度的随机变化导致反射系数在时间和空间上都存在波动，这种波动直接影响了各多途分量的相对强度。冰层的运动特别是漂移运动产生的多普勒频移使得信道统计特性随时间演化，增加了信道建模和均衡的难度。因此，需要设计更为适合的信道均衡技术来应对冰区特有的传播条件。

基于传播特性分析，冰下水声信道可以用有限冲激响应模型来准确描述。该模型将复杂的连续信道简化为离散的多径模型： $h(n) = \sum_{i=1}^{L-1} \alpha_i \delta(n - \tau_i)$

其中 α_i 和 τ_i 分别表示第 i 条多途的复增益和相对时延， L 为有效多途分量的总数。复增益 α_i 包含了幅度和相位信息，反映了各条传播路径的衰减和相位变化特性。

(二) 判决反馈均衡器设计

传统的线性均衡器在面对存在深度频率衰落的信道时往往性能有限，特别是当信道传递函数在某些频率点接近零时，线性均衡器会产生严重的噪声放大效应。因此，本文采用判决反馈均衡器来处理冰下水声信道复杂的码间干扰问题。

判决反馈均衡器的核心思想是将均衡过程分为前向均衡和后向消除两个阶段。前馈滤波器主要负责补偿信道的幅频特性和消

除前向码间干扰，而反馈滤波器则利用已经正确判决的符号来消除后向码间干扰。这种结构巧妙地避免了线性均衡器在深度衰落点的噪声放大问题。

(三) 分数间隔均衡技术

传统的码元间隔均衡器以符号速率 $1/T$ 进行采样，这种采样方式在理论上满足奈奎斯特采样定理的要求，但在实际应用中容易产生频谱混叠现象，特别是当发射滤波器和接收滤波器的设计不够理想时。分数间隔均衡器通过以高于符号速率的频率进行采样，有效解决了这一问题。

分数间隔均衡器以 M/T (其中 $M > 1$ 为整数) 的速率对接收信号进行采样，通常选择 $M = 2$ ，即以两倍符号速率采样。这种过采样方式确保了接收信号的频谱不会发生混叠，使得均衡器能够完全恢复发送信号的频谱特性。

(四) 自适应算法实现

考虑到冰区信道的强时变特性，静态的均衡器设计难以适应信道参数的实时变化。因此，本文采用自适应算法来实现均衡器系数的在线更新。相比于常用的最小均方 (LMS) 算法，递归最小二乘 (RLS) 算法具有更快的收敛速度和更好的跟踪性能，特别适合于快时变信道环境。

三、仿真实验与结果分析

(一) 仿真参数配置

为了验证所提出方法的有效性，设计了完整的冰下水声通信仿真实验。实验采用 QPSK 调制方式，这种调制方式在水声通信中应用广泛，能够在相对较低的信噪比条件下实现可靠的数据传输。载波频率设置为 12 kHz，这一频率选择兼顾了传播距离和带宽效率的要求。符号速率设定为 1000 bps，符合冰下低速率通信的实际需求。

(二) 信道冲激响应特性

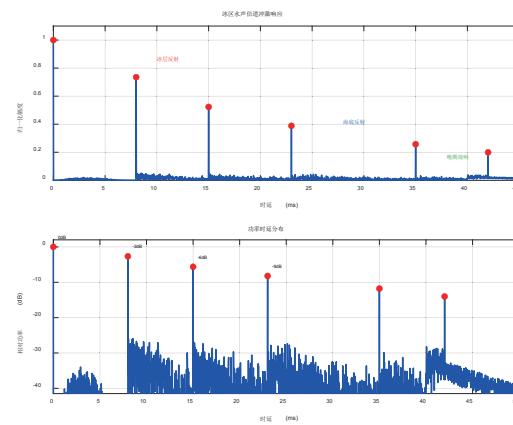


图 1 水声信道的冲激响应特性

仿真首先分析了冰区水声信道的冲激响应特性。数值计算结果显示，相比于开阔水域环境，冰区信道的多途时延扩展明显增大，这主要是由于冰层下表面的强反射作用造成的。从图 1 的结果

可以看出, 主要多途分量分布在0~40 ms的时间范围内, 这一时间扩展远大于开阔海域的典型值。

(三) 性能比较

QPSK 调制的星座图分析直观地反映了不同均衡技术的效果差异, 仿真解码星座图如图2所示。在无均衡处理的情况下, 由于严重的码间干扰和信道失真, 接收到的星座点出现严重散乱, 四个理想的 QPSK 星座点完全无法识别, 系统基本无法正常工作。

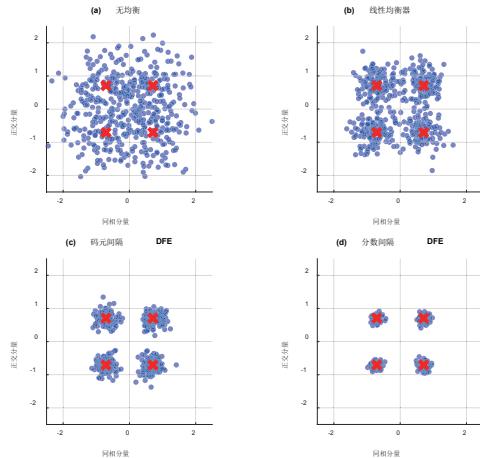


图2 解码星座图

采用传统线性均衡器后, 星座图有了明显改善, 四个星座点的轮廓开始显现, 但仍然存在显著的符号间干扰。特别是在信道存在深度衰落的情况下, 线性均衡器的噪声放大效应导致星座点的散布仍然较大, 影响了判决的可靠性。使用传统码元间隔判决反馈均衡器进一步改善了星座图质量, 星座点的聚集度有所提高, 但由于频谱混叠的影响, 性能提升有限。分数间隔判决反馈均衡器显著改善了星座图质量。四个 QPSK 星座点分布清晰, 聚集度大幅提高, 接近理想的无干扰情况。

误码率是衡量通信系统性能的最重要指标。仿真实验在不同信噪比条件下对比了各种均衡技术的误码率性能。在信噪比为5 dB的典型工作条件下, 无均衡系统的误码率约为 3×10^{-2} , 这一水平完全无法满足实际通信需求。传统线性均衡器将误码率降低至

8×10^{-3} , 虽然有所改善但仍然不够理想。这主要是因为线性均衡器在处理频率选择性衰落时存在固有局限性, 特别是在深度衰落

点附近的噪声放大问题严重影响了整体性能。码元间隔判决反馈均衡器的误码率降至 2×10^{-3} , 相比线性均衡器有明显提升。分数间隔判决反馈均衡器为 1×10^{-4} , 具有最好的效果。

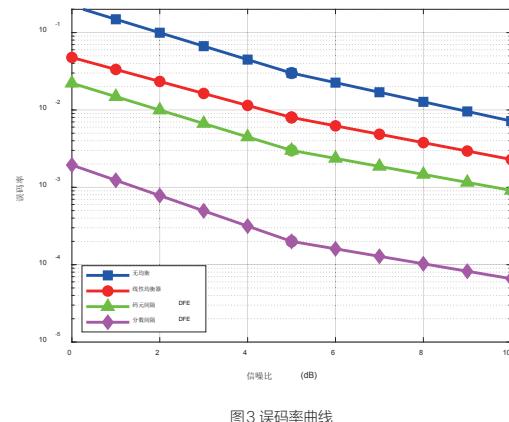


图3 误码率曲线

在不同信噪比条件下的对比实验进一步验证了本文方法的优越性, 误码率曲线如图3所示。当信噪比从0 dB增加到10 dB时, 分数间隔判决反馈均衡器始终保持着相对于其他方法的性能优势。特别是在低信噪比区域, 这种优势更为明显, 表明该方法在恶劣信道条件下具有更好的鲁棒性。

五、结论

本文针对冰区水声通信面临的复杂信道条件, 提出了基于分数间隔判决反馈均衡器的相干通信方法。通过建立冰区浅海波导传播模型并采用比例边界有限元方法分析冰下多途传播特性, 设计的分数间隔判决反馈均衡器结合了分数间隔采样和判决反馈结构的优势, 有效解决了传统均衡技术在冰区环境中面临的频谱混叠和深度衰落问题。仿真实验表明, 采用 QPSK 调制的通信系统在信噪比为5 dB时实现了 1×10^{-4} 的误码率, 验证了所提方法的有效性。该研究为冰下水声通信系统的工程设计提供了重要的理论指导和技术支撑, 为北极地区的资源勘探、环境监测等应用奠定了技术基础。

参考文献

- [1] 张帅, 吴振磊, 刘畅, 等. 二维水下声学标识物设计及成像试验研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(06): 1140~1144.
- [2] 洪丹阳, 王巍, 尹力, 等. 改进的时序多重稀疏贝叶斯学习冰下水声信道估计方法 [J]. 声学学报, 2022, 47(05): 591~602. DOI: 10.15949/j.cnki.0371-0025.2022.05.013.
- [3] 柯磊. 冰层覆盖下距离相关的双声道波导声传播研究 [D]. 重庆交通大学, 2024. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2024.000665.
- [4] 翁晋宝, 杨燕明, 文洪涛, 等. 北极冰下声传播特性实验研究 [J]. 海洋学报, 2019, 41(03): 76~85.
- [5] 汤新华, 基于高速水声通信技术的海洋立体观测系统的开发及产业化. 福建省, 厦门斯坦道科学仪器股份有限公司, 2024-01-25.