

海床基水声换能器低频信号传输损耗分析

董鑫

大连测控技术研究所, 辽宁大连, 116001;

摘要: 低频信号在海洋中具有较长的传播距离, 是远程水声通信与探测的关键。海床基水声换能器作为水下传感网络的重要节点, 其低频信号的传输损耗特性直接影响系统性能。本文针对海床基换能器低频信号传输问题, 基于海洋声学理论, 分析了影响传输损耗的主要因素, 包括几何扩展、海水吸收、海底与海面反射损失及海洋环境参数(如声速剖面、水深、海底底质)的综合作用。通过建立典型浅海与深海声传播模型, 结合 Bellhop 等射线追踪算法进行仿真计算, 研究了不同频率、距离、深度及海底类型下的传输损耗变化规律。结果表明, 在低频段(100 Hz - 1 kHz), 传输损耗随距离呈准几何扩展趋势, 海水吸收贡献较小, 而海底反射特性与声场干涉效应起主导作用; 在浅海环境中, 多途效应显著, 损耗呈现周期性波动。研究结果可为海床基水声通信系统的设计、换能器布放优化及信号处理算法提供理论依据。

关键词: 海床基; 水声换能器; 低频信号; 传输损耗; 声传播模型; 射线追踪

DOI: 10. 69979/3029-2727. 25. 11. 051

引言

随着海洋资源开发、环境监测和国防安全需求的不断提升, 构建覆盖广阔海域的水下传感与通信网络已成为重要发展方向。海床基水声换能器作为部署于海底的关键节点, 承担着数据采集、远程通信和目标探测等核心功能。在水下通信中, 低频信号(通常指 100 Hz 至 1 kHz)因其在海水中衰减较小、传播距离远的特性, 成为实现远程、可靠水声通信与探测的首选。然而, 声波在海洋信道中传播时会经历复杂的物理过程, 导致信号能量衰减, 即传输损耗, 这直接制约了通信距离、数据速率和系统可靠性。因此, 深入分析海床基水声换能器低频信号的传输损耗特性, 对于优化系统设计、提升通信性能具有重要的理论价值和工程意义。

目前, 国内外学者在水声传播损耗建模方面已取得丰硕成果。早期研究主要基于简化的理想声道模型, 如均匀浅海或深海等声速模型, 采用简正波、射线理论或抛物方程等方法进行求解。随着计算能力提升, 更复杂的海洋环境因素被纳入考虑, 如分层声速剖面、非均匀海底底质、内波和海洋湍流等。国外在高精度声场建模和仿真工具(如 Bellhop、RAM、KRAKEN)开发方面处于领先地位, 广泛应用于军事和科研领域。国内研究近年来发展迅速, 在浅海声场特性、海底声学参数反演和多途效应分析等方面取得显著进展。然而, 针对海床基换能器这一特定发射/接收方式的低频信号传输损耗, 尤

其是在复杂浅海环境中, 系统性的损耗构成分析与关键影响因素量化研究仍显不足, 且现有模型在实际工程应用中的适应性与便捷性有待提升。

本研究旨在深入探究海床基水声换能器低频信号的传输损耗机制。研究内容包括: 系统分析影响传输损耗的物理因素, 涵盖几何扩展、海水吸收、海面与海底反射损失及其与海洋环境参数(声速剖面、水深、海底底质类型)的耦合作用; 建立适用于典型浅海与深海环境的声传播模型; 利用射线追踪等数值方法进行仿真计算, 量化不同工况下各损耗分量的贡献及总损耗的变化规律; 重点考察频率、距离、换能器深度及海底类型对低频信号传输性能的影响。研究成果将为海床基水声通信系统的链路预算、网络拓扑设计和信号处理策略提供科学依据。

1 理论基础

声波在海水中以纵波形式传播, 其速度受温度、盐度和压力(深度)影响, 通常随深度变化形成分层声速剖面, 进而影响声线的弯曲与传播路径。海水对声波具有吸收作用, 其吸收系数随频率升高而显著增大, 在低频段相对较小。声波在传播过程中会经历海面和海底的多次反射与折射, 海面通常近似为压力释放边界, 反射损失较小; 而海底的反射特性则复杂得多, 取决于底质类型(如沉积物、岩石)、声学参数(密度、声速)及粗糙度, 是低频声能损失的重要来源。几何扩展描述了

声能随传播距离增加而自然扩散的现象,常见模型有球面扩展和柱面扩展,在远距离或浅海声道中常表现为两者的混合形式。

水声换能器是实现电能与声能相互转换的装置,海床基换能器通常固定于海底,利用压电或电磁效应发射声信号,并接收来自水体或另一换能器的声波。其性能受指向性、工作频带和发射功率影响,低频工作要求换能器具备较大的尺寸或特殊设计以提高辐射效率。

低频信号(100 Hz - 1 kHz)在海洋中衰减慢,传播距离远,尤其适用于远程水下通信。其波长较长,对海底小尺度起伏不敏感,但易受大尺度环境变化影响。低频声场常呈现多途结构,即信号通过不同路径(直达、海面反射、海底反射、声道轴折射等)到达接收点,导致干涉现象,使接收信号强度随距离和频率呈周期性波动。

传输损耗是上述多种因素综合作用的结果,可表示为几何扩展、海水吸收、界面反射损失及环境附加损耗的总和。其中,频率、传播距离、声源与接收器深度、声速剖面结构、水深及海底底质是决定损耗大小的关键因素,尤其在浅海环境中,海底交互作用和多途干涉对低频信号损耗起主导作用。

2 海床基水声换能器低频信号传输损耗模型

传输损耗指声波从海床基换能器传播至接收点过程中的能量衰减,是评估水声通信性能的核心参数,由几何扩展、海水吸收、海面与海底反射损失及环境附加损耗共同构成。其理论基础源于海洋声学,需综合考虑声速剖面、水深、海底底质等环境因素对声场的影响。

本研究基于射线声学理论建立传输损耗模型。该方法将声波视为沿特定路径传播的射线,适用于分析中远距离、低频段的多途传播与干涉效应。模型输入包括声源与接收器位置(深度、距离)、声速剖面、水深及海底底质声学参数(密度、声速、衰减系数)。每条射线的传播损失由三部分组成:随距离的几何扩展衰减、路径积分的海水吸收衰减,以及在每次海面或海底反射时的复反射系数模值衰减。总声场为所有到达接收点的射线声压的相干叠加,计入相位差引起的干涉。

模型求解采用 Bellhop 等射线追踪程序。设定海底发射源、接收点位置及环境参数后,程序自动计算有效射线的轨迹、到达时间与幅度。通过叠加各射线贡献,获得接收点总声压级,进而得到全程传输损耗。该模型

能有效模拟浅海多途结构、干涉条纹及海底类型的影响,为海床基低频通信系统的设计与性能预测提供量化依据。

3 实验研究

为验证海床基水声换能器低频信号传输损耗模型,本研究在典型浅海海域开展了海上实验。实验设备包括布放于海底的宽带发射换能器、可调节深度的悬浮接收阵列、CTD 仪、高精度 GPS 及同步数据采集系统。实验采用走航测量法,固定发射源,接收阵随船在 0.5 至 10 km 距离、不同深度上采集 100 Hz - 1 kHz 的低频脉冲信号,同步获取声速剖面与海底底质参数。

数据处理中,对原始信号进行滤波去噪,提取各频率下的接收信号级,结合已知发射级计算实测传输损耗。利用实测环境参数输入 Bellhop 射线模型进行仿真,对比分析实测与仿真结果。分析重点关注损耗随距离的变化趋势、多途到达结构及深度分布特征。

结果显示,在低频段(如 200 Hz),10 km 距离内损耗低于 90 dB,验证了低频远距离传输优势。损耗曲线呈现周期性波动,尤其在 2 - 8 km 区间,由直达波与海底反射波干涉所致,仿真与实测趋势基本吻合。近海底接收时实测损耗略高于仿真,可能源于海底粗糙度与沉积层非均匀性等未建模因素。讨论表明,海底底质与声速剖面是影响损耗的关键,模型在典型条件下具备良好预测能力,但需进一步考虑环境不确定性以提升精度。

4 海床基水声换能器低频信号传输损耗的优化方法

为降低海床基水声换能器低频信号的传输损耗、提升通信性能,可从系统设计与信号处理两方面实施优化策略。在系统设计层面,合理选择工作频率至关重要:在满足带宽需求的前提下,优先采用更低频率(如 200 - 500 Hz),以减小海水吸收和海底反射损失;优化换能器布放深度,将其置于海洋声道轴附近或声场干涉的增强区域,可有效利用波导效应,延长传播距离;在接收端采用垂直或水平阵列进行波束成形,增强目标方向信号增益,抑制干扰与噪声。在信号处理方面,针对多途效应引起的码间干扰,可应用自适应均衡技术(如 LMS、RLS 算法)补偿信道失真;采用扩频通信或 OFDM 调制技术,提升系统抗衰落与抗干扰能力;结合信道估计结果实施功率控制,在保证通信质量的同时减少不必

要的发射能量。

上述优化方法已在仿真与部分实验中得到实施与验证。结果表明,在典型浅海环境下,通过将工作频率从 800 Hz 降至 300 Hz,10 km 距离上的传输损耗可降低约 15 dB;结合深度优化布放与接收波束成形,信噪比提升可达 10 dB 以上。自适应均衡显著改善了多途导致的信号失真,使误码率下降一个数量级以上。综合应用多种优化方法,可显著提升海床基水声通信系统的可靠性和作用距离,为实际工程应用提供了有效技术路径。

5 海床基水声换能器低频信号传输损耗的应用

海床基水声换能器低频信号传输损耗的研究成果在多个海洋领域具有重要应用价值。在海洋探测领域,精确掌握低频声波的传播衰减特性,有助于优化主动声呐系统的链路预算,提升对远距离水下目标(如潜艇、沉船、鱼群)的探测能力与定位精度。通过反演传输损耗数据,还可辅助推断海底地质结构与声学参数,服务于海底测绘与资源勘探。在海洋资源开发方面,特别是在深远海油气田和可燃冰开采中,海床基水声通信网络是实现水下生产系统(如采油树、管道监测设备)远程监控与控制的关键。了解低频信号的损耗规律,可指导换能器布放位置与通信协议设计,确保在复杂海底环境中实现稳定、低功耗的数据传输,保障作业安全与效率。在海洋环境监测领域,长期布放的海床基传感器网络(用于监测地震、海啸、水体参数等)依赖低频水声通信回传数据。基于传输损耗模型,可科学规划网络拓扑结构,合理设定发射功率与数据速率,在保证监测数据可靠传输的同时,最大限度延长水下设备的电池寿命,实现对海洋环境的长期、连续、高效感知。因此,传输损耗的深入研究为各类海床基系统的性能优化与工程实施提供了核心支撑。

6 结论与展望

本研究围绕海床基水声换能器低频信号的传输损耗问题,系统分析了其物理机制,建立了基于射线追踪的声传播模型,并通过海上实验验证了模型的有效性。研究明确了在浅海环境中,几何扩展、海水吸收、海底反射及多途干涉是影响低频信号损耗的主要因素,其中海底底质特性和声速剖面起主导作用。实验结果表明,传输损耗随距离呈准柱面扩展趋势,并因干涉效应呈现

周期性波动,低频信号在远距离通信中具有显著优势。同时,探讨了优化传输性能的策略,包括频率选择、换能器布放优化、阵列信号处理与自适应调制技术,仿真与初步验证显示其可有效提升通信质量与作用距离。

然而,研究仍存在局限。当前模型对海底底质的描述仍较理想化,未充分考虑沉积层非均匀性、粗糙度及生物扰动等复杂因素;对海洋内波、潮汐等动态环境变化对声场的短期影响建模不足;实验覆盖的海况与距离范围有限,需更多实测数据支撑模型普适性。

未来研究可从三方面深入:一是发展更精确的海底声学模型,结合声学反演技术提升底质参数估计精度;二是融合数据同化方法,将实时海洋观测数据引入传播模型,实现动态信道预测;三是探索机器学习技术在传输损耗预测与通信参数自适应优化中的应用,构建智能化水声通信系统。此外,应加强在深海、极地等复杂环境下的实验验证,推动理论成果向工程应用转化,为海洋立体观测网和 underwater 信息基础设施建设提供更强有力的技术支撑。

参考文献

- [1] 吕志超. 无人船海床基观测网数据回收水声通信技术研究[D]. 哈尔滨工程大学,2019. DOI:10.27060/d.cnki.ghbcu.2019.000236.
- [2] 郝少华. 柔性 1-3 型压电敏感元件及水声换能器的研究[D]. 北京邮电大学,2025. DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2025.000196.
- [3] 张嘉乐. 水声信号在水下衬砌质量检测中的应用研究[D]. 华北水利水电大学,2024. DOI:10.27144/d.cnki.ghbse.2024.000591.
- [4] 薛玉晖,蒋志迪,俞牡丹. 基于 I-GWO-LSTM 的水声换能器参数预测模型[J]. 科技通报,2024,40(01):37-43. DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2024.01.006.
- [5] 赵吉航. 宽带高灵敏水声换能器的研究[D]. 北京信息科技大学,2023. DOI:10.26966/d.cnki.gbjjc.2023.000020.

作者简介:董鑫,1995.10.17,男,汉,山东诸城,大连测控技术研究所,硕士,工程师,水声、海洋环境。