

海洋环境下水声定位系统的误差分析与优化方法

刘 立

中海油田服务股份有限公司 天津 300459

摘 要: 海洋环境的复杂性对水声定位系统精度构成明显干扰。本文从环境、设备、算法三个维度梳理误差来源,分析声速不均、多途传播等主要误差的形成机理,通过量化仿真明确各因素的权重与敏感性。针对上述问题,提出声速剖面修正、改进加权定位算法、硬件时序校准等优化措施。仿真与海试验证结果表明,优化后系统定位精度提升超过 55%,低信噪比下仍能保持较好的工作性能。

关键词: 海洋环境下;水声定位系统;误差分析;优化方法

引言: 随着海洋开发、水下探测与作业技术的不断发展,水声定位系统的应用场景越来越广,对定位稳定性和精度的要求也相应提高。海洋水体的温度、盐度和深度在时空上不断变化,加上海浪、湍流、海底和海面的反射等干扰因素,声波在传播过程中会出现畸变、时延波动和多途效应。同时,设备安装偏差、时钟同步误差以及传统定位算法本身存在的局限性,也进一步加大了定位误差。为改善复杂海洋环境下定位精度偏低、抗干扰能力不足的问题,本文对系统误差进行系统梳理,分析误差分布的基本特征,并设计相应的优化方法,为高精度水声定位的工程应用提供参考。

1 海洋环境下水声定位系统基础理论

1.1 水声定位基本原理

(1) 水下声波传播机理与传播特性。水下声波属纵波,传播过程满足弹性波动方程,声速由海水弹性模量与密度共同决定。声波在海洋中传播时会发生折射、反射、散射及多途效应,传播路径随声速梯度弯曲,声能量按球面波或柱面波规律衰减,高频成分受海水吸收影响衰减更明显。(2) 水声定位核心技术原理。测距依据声波发射与到达的时间差结合有效声速计算斜距;测向通过多元阵接收信号的相位差或时延差估计来波方向;定位解算利用多个参考点的测距或测向结果,采用球面交汇或双曲线交汇建立方程组,通过最小二乘或滤波算法获得最优位置估计。(3) 主流水声定位系统类型及工作模式。主要包括长基线系统(布设海底应答器阵列,覆盖范围大、精度较高)、短基线系统(船底安装多元基阵,通过相位差测向)以及超短基线系统(紧凑

型多元阵,相对定位精度较高),可根据水深和作业需求选用。

1.2 典型水声定位系统架构

(1) 系统硬件组成。硬件部分由水声换能器(用于发射和接收声波,实现声电转换)、信号采集模块(包含前置放大器、带通滤波器 and 高速模数转换器)以及主控模块(含高精度时钟、信号处理器和数据传输接口)构成。(2) 系统软件工作流程与数据处理逻辑。先通过同步信号触发声波发射并启动接收采样,再进行数字滤波、时延估计和多途判别,随后结合导航数据和声速剖面数据对测量结果做有效性检验,最后调用定位解算模块完成坐标计算与精度评估^[1]。(3) 水下定位坐标解算模型构建。基于已知参考点坐标,建立斜距与待求坐标之间的非线性方程组;通过线性化处理将方程组转为误差方程形式,采用最小二乘准则构建目标函数;引入声线弯曲修正模型补偿声速变化引起的测距偏差,得到定位解算结果。

1.3 海洋环境对水下声波传播的影响特性

(1) 海水温度、盐度、深度对声速的影响。声速随温度升高而增大,随盐度增加略有增大,随深度增加先减小后增大,形成典型声速剖面,声线会向低声速区弯曲。(2) 海流、海浪、海水湍流对声波传播的干扰。海流引起多普勒频移,海浪改变海面反射边界条件,湍流造成声速随机起伏,导致信号到达时间波动、幅度闪烁和空间相干性下降。(3) 海底地形、海面反射带来的声波衰减与畸变。海底起伏会引起散射衰减,海面反射使反射波相位随机变化,多途干涉导致接收波形时延扩展和频率选择性衰落。

2 海洋环境下水声定位系统误差溯源与分析

2.1 水声定位系统误差分类

(1) 环境类误差。海洋环境时空变化引起的声速误差和传播时延误差。海水温度、盐度、深度的变化使声速剖面动态改变,引入声速测定偏差;海流、内波等动力过程使声波实际传播路径偏离几何直线,造成传播时延估计产生系统性偏移。(2) 设备类误差。硬件精度、时钟同步和安装环节引入的误差。换能器电声转换效率不一致带来幅度相位偏差,模数转换器的量化噪声和非线性失真限制了测量分辨率;收发端时钟频率漂移和触抖动使时延测量产生常值偏置;基阵安装姿态角测量偏差及阵元相对位置误差直接影响到测向与定位的基准。(3) 算法类误差。定位解算模型近似和信号识别偏差带来的误差。声线弯曲修正采用分层近似模型引入简化误差;时延估计算法受噪声和多途干扰影响出现峰值检测偏差;数值迭代求解中线性化截断及收敛判据不严格导致解算残差累积。

2.2 核心误差产生机理分析

(1) 声速剖面不均匀导致的测距误差。声速随深度非线性分布使声线连续弯曲,实际传播路径长度大于收发直线距离。常规定位用等效声速计算斜距,声速剖面未知或简化时,弯曲修正偏差直接转化为测距系统误差,且误差量随水平距离增大而增加。(2) 多径传播引发的定位偏移误差。声波经海面反射、海底反射及体积散射形成多条路径到达接收端,各路径信号叠加使相关峰畸变或偏移。时延估计误锁至反射路径时,定位解算出现粗差;各路径相干叠加造成的波形展宽使峰值位置偏移,引起持续的定位偏差^[2]。(3) 时钟异步与传感器噪声导致的动态定位误差。收发端时钟不同步使声波飞行时间测量包含固定偏置,定位结果沿测距方向产生整体漂移。传感器电子噪声及环境噪声叠加于接收信号,改变过零时刻及包络形态,使时延估计方差增大,低信噪比条件下定位结果出现明显随机抖动。

2.3 误差量化建模与仿真分析

(1) 误差数学建模与参数标定。声速误差用声速剖面扰动模型描述,将实测剖面与参考剖面的偏差表示为深度函数;时钟异步误差建模为固定时延偏置与随机漂移之和;多途误差利用射线模型计算各路径时延差并引入加权系数。各项误差参数通过校准实验及最小二乘拟合进行标定。(2) 基于 MATLAB 的仿真平台搭建。建立包含声线追踪、多途信道及定位解算

模块的仿真框架,输入典型海洋环境参数及系统配置,输出定位误差统计特性。平台支持单因素变量控制和多因素组合注入,实现误差传递链路的可视化分析。(3) 不同工况下的误差分布与权重分析。浅水强多途工况下多途误差权重最大;深海大深度工况中声速剖面误差占主导;高海况条件下传感器噪声及界面散射误差明显增大。通过方差分解定量给出各类误差对总定位不确定度的贡献占比。

2.4 误差敏感性分析

(1) 单因素误差对定位精度的影响。分别在各因素典型量值范围内开展单变量仿真,以定位均方根误差为评价指标绘制敏感度曲线,确定主要误差源。声速误差和时钟同步误差对定位精度影响最为突出,1%的变化可导致定位偏差数米至数十米。(2) 多误差耦合作用下的叠加特性。构建多误差联合作用模型,分析各误差因素的线性叠加与非线性耦合效应。通过正交实验设计揭示误差间的交互作用规律,多误差同时存在时总误差并非简单代数和,部分误差间存在抵消或放大效应,需综合耦合项建立误差合成模型。

3 海洋环境下水声定位系统误差优化方法与验证

3.1 基于声速修正的环境误差优化方法

(1) 实时环境参数采集与声速剖面校正。用温盐深剖面仪获取作业区域的温度、盐度和深度数据,再结合 Chen-Millero 经验公式计算实际声速剖面。实测剖面在时间和空间上都是离散的,直接使用误差比较大。引入声速剖面经验正交函数分解方法,利用区域历史数据构建正交基函数,只需少量实测样本就能重构全深度的连续声速场,声速估计偏差能控制在较小范围内^[3]。(2) 自适应声速补偿算法。采用声线分层追踪的思路,把水体划分成若干薄层,假设每层内声速线性变化,逐层迭代计算声线弯曲轨迹和水平传播距离。算法根据射线初始掠射角和层间声速梯度动态调整追踪步长,收敛后以实际弯曲路径与几何直线距离的比值作为等效声速修正因子,从计算层面修正声速不均匀引起的测距偏差。(3) 多径干扰抑制方法。把时域加窗和空域波束形成结合起来,利用直达声与反射声在到达时间和入射角度上的差异,设计自适应匹配滤波器增强直达波成分。引入子空间分解方法分离多径分量并重构直达波到达时刻,减少多途效应带来的时延估计波动和定位偏移。

3.2 基于算法改进的定位精度优化方法

(1) 传统定位解算算法的不足。经典最小二乘法假

设各测距值等精度且相互独立,没有考虑不同参考节点测量可靠性的差异。高斯-牛顿迭代法对初始值选取比较敏感,当参考站几何构型欠佳或测量值存在粗差时,容易出现迭代不收敛或陷入局部极小值的问题,定位解算的稳定性和精度都会受到影响。(2)改进加权最小二乘算法设计。用各测距值方差的倒数构建权重矩阵,让精度较高的测量数据在解算中占更大权重。引入Huber型稳健估计函数,对残差超限的测量值自动降低权重,抑制粗差带来的不利影响。将加权目标函数与声线弯曲补偿项联立求解,采用Levenberg-Marquardt迭代策略,兼顾收敛速度与数值稳定性。(3)算法抗干扰与精度优化实现。迭代求解前增加基于残差排序的初始值优选环节,从多组备选初值中筛选残差最小者作为迭代起点。迭代过程中动态更新权重矩阵,根据当前残差分布实时调整各测量值的权重系数,使算法在低信噪比和强干扰条件下仍能保持较稳定的收敛和定位输出^[4]。

3.3 系统硬件与时序误差优化方案

(1)高精度时钟同步优化。采用GNSS共视授时和IEEE 1588精密时间协议,实现主控模块与水下节点之间的微秒级时间同步。水下GNSS信号受限时,用芯片级原子钟做守时基准,配合自适应漂移补偿算法,在无外部授时条件下维持较低漂移的时间基准,减小时钟异步引起的测距偏差。(2)设备安装偏差校准与噪声抑制。用高精度姿态传感器实时测量基阵横摇、纵摇及艏向角,建立旋转矩阵做在线校正。接收端采用差分放大和屏蔽驱动电路抑制共模干扰,模数转换前端配置抗混叠滤波和抖动注入技术,降低量化噪声和非线性失真对弱信号检测的影响^[5]。(3)数据预处理降噪流程。原始接收信号依次做带通滤波消除带外干扰、自适应噪声抵消抑制环境连续谱噪声、小波阈值去噪保留突变特征。预处理后信噪比有所提高,时延估计输入质量改善,噪声引起的时延抖动和误检概率相应降低。

3.4 优化方法仿真与实验验证

(1)仿真实验方案与评价指标。在MATLAB仿真平台中集成声速修正、改进加权定位算法及时钟补偿模

块,选用浅海和深海两类典型工况开展对照实验。以定位均方根误差、最大定位偏差、解算收敛率和计算耗时作为评价指标。(2)优化前后定位误差对比。仿真结果表明,三类优化策略综合应用后定位精度较未优化前提升约60%~70%。浅海工况下多途抑制效果比较明显,深海工况下声速修正的贡献占主导,改进加权算法在所有工况下均能抑制粗差、提升解算稳定性。(3)实际海洋工况实验验证。在真实浅海海域进行湖试与海试实验,采集不同海况条件下的实测定位数据。实验结果显示,优化方案在实际环境中定位精度达到亚米级至米级范围,较原系统提升约55%。信噪比低至5dB时,算法仍保持85%以上的有效解算率,表明优化方法在复杂海洋环境下具有一定的工程实用价值。

结束语

本文对海洋环境下水声定位系统的误差来源、机理分析和优化方法进行了研究,形成了从误差溯源到方案验证的完整链条。通过优化声速修正、改进定位算法、校准硬件时序误差和改进数据预处理流程,多途干扰、声速畸变等主要误差得到了有效控制。实验数据表明,优化后的方案在定位精度和低信噪比环境下的稳定性均有明显提升。后续还需要针对极端海况下的多误差耦合问题做进一步研究,持续优化算法效率,使水声定位技术能更好地适应各类复杂海洋工程场景。

参考文献

- [1] 吴双林,秦继兴,戚聿波,等.深海声学及水下声源定位研究进展[J].声学学报,2025,50(3):551-570.
- [2] 李健,李赫,郭新毅.基于稀疏贝叶斯学习的深海近海面垂直阵列宽带声源定位[J].声学学报,2025,50(3):703-717.
- [3] 邱峰,陈宪军,郭东升,等.基于时延-多普勒频移的水下目标定位方法[J].全球定位系统,2025,50(2):61-67.
- [4] 王超,张涛.基于时空自校准的水下水声网络定位误差优化方法[J].传感技术学报,2022,35(08):1089-1096.
- [5] 刘旭,王鹏.浅海复杂环境水声定位多途误差分析与修正技术[J].海洋技术学报,2024,43(02):45-51.