

# 井下人员精确定位系统的抗干扰算法优化

武楠

陕西彬长大佛寺矿业有限公司 陕西 咸阳 712000

**摘要:**为解决井下人员精确定位系统受复杂干扰导致定位精度不足的问题,本文开展抗干扰算法优化研究。首先分析井下干扰源分类及对定位信号的影响机理,明确现有抗干扰算法缺陷;随后提出两种优化算法:基于改进自适应滤波算法通过干扰预判、变步长调整及多通道协同提升动态干扰抑制能力,融合多特征算法通过多维特征提取与算法协同实现精准抗干扰。研究表明,优化算法可有效提升定位信号信噪比与定位稳定性,适配井下复杂干扰环境,为井下人员精确定位提供有效技术方案,具有重要工程应用价值。

**关键词:**井下人员;精确定位;抗干扰算法;优化

引言:井下作业环境封闭复杂,电磁干扰、多径干扰等问题严重影响人员精确定位系统性能,制约作业安全管控效能。现有抗干扰算法存在动态适配性差、混合干扰抑制能力不足等缺陷,难以满足井下实时精准定位需求。基于此,本文以提升井下人员定位系统抗干扰能力为核心目标,结合井下干扰特性,开展抗干扰算法优化研究。通过分析干扰源分类与影响机理,优化设计改进自适应滤波算法与融合多特征抗干扰算法,为井下人员精确定位提供可靠技术支撑,保障作业人员安全与生产有序开展。

## 1 井下人员精确定位系统基础理论

### 1.1 井下定位系统核心架构

井下人员精确定位系统核心架构采用“终端-网络-平台”三层分布式设计,实现人员位置信息的采集、传输与处理。定位终端集成定位模块、通信模块与供电模块,佩戴于作业人员身上,实时发送包含身份标识与位置相关的信号;信号传输网络采用有线与无线融合的拓扑结构,通过部署在井下巷道的中继节点、基站等设备,解决井下信号衰减问题,保障数据稳定传输;数据处理与定位平台作为核心中枢,负责接收全网数据,通过定位解算算法完成位置计算,并实现人员轨迹追踪、异常预警等功能,架构设计充分考虑井下环境封闭、空间复杂的特点,具备较强的环境适应性。

### 1.2 主流定位技术原理

当前井下主流定位技术以射频识别(RFID)和超宽带(UWB)为主。RFID定位技术基于电磁感应原理,通过阅读器接收标签发射的射频信号,结合信号强度检测实现粗略定位,具有成本低、功耗小、抗粉尘干扰能力强的优势,适用于井下大范围人员存在性监测;UWB定位技术利用纳秒级窄脉冲信号传输,通过测量信号飞行

时间(TOF)或到达时间差(TDOA)实现精确定位,具备定位精度高、抗多径干扰能力强的特点,可满足井下关键区域人员精确定位需求。此外,惯性导航定位技术作为补充,通过检测人员运动加速度与角速度推算位置,可在无信号覆盖区域实现短时定位,提升系统定位连续性。

### 1.3 定位精度评价指标

定位精度评价指标是衡量系统性能的核心依据,主要包括以下三大类。(1)定位误差量化标准以均方根误差(RMSE)和最大绝对误差为核心,前者反映定位结果与真实位置的整体偏差程度,后者体现极端情况下的定位精度,井下场景通常要求均方根误差不超过1米;(2)实时性评价参数以定位延迟为核心,即从终端发送信号到平台输出定位结果的总耗时,井下应急响应需求要求定位延迟不超过2秒;(3)稳定性评价通过连续定位时长、定位结果有效率等参数衡量,确保系统在长时间井下作业环境中持续稳定输出可靠的定位数据,有效避免因信号干扰导致的定位中断<sup>[1]</sup>。

## 2 井下定位环境干扰特性分析

### 2.1 井下环境干扰源分类

井下环境干扰源种类复杂,与开采作业流程及井下地质环境密切相关,主要可分为以下两类:(1)电磁类干扰源,源于井下开采设备运行与电气系统工作,包括采掘设备、运输设备等大型机电设备启停及运行时产生的电磁辐射,井下供电线路的工频干扰及漏电产生的杂散电磁场,此类干扰覆盖频率范围广,易对定位射频信号产生叠加干扰;(2)环境与信道类干扰源,受井下封闭空间与地质条件影响,包括巷道岩壁、支架等构筑物引发的信号反射散射形成的多径干扰,井下高粉尘、高湿度环境导致的信号传播介质特性变化,以及开采作业

引发的巷道变形、围岩松动带来的信道稳定性波动，这类干扰直接影响信号传输路径与衰减规律。

## 2.2 干扰对定位信号的影响机理

干扰信号通过多种机理作用于定位信号，导致定位精度下降，核心影响路径如下：（1）信号特征畸变机理，电磁干扰与环境干扰会使定位信号的幅值出现无规律波动，相位产生非线性偏移，破坏信号原有调制特征，导致信号解调困难，同时干扰信号的叠加会改变定位信号的频率成分，使有效信号被噪声淹没，影响信号提取效率；（2）定位解算偏差机理，干扰会导致信号传输时延产生随机波动，使基于时间差、飞行时间的定位算法核心参数计算出现偏差，同时干扰引发的信号衰减不平衡会破坏定位基站间的信号同步性，导致定位坐标系基准偏移，进一步放大定位误差，且干扰强度的动态变化会使定位误差呈现非线性增长趋势<sup>[2]</sup>。

## 3 现有井下定位抗干扰算法分析

### 3.1 经典抗干扰算法原理与应用

现有井下定位系统常用的经典抗干扰算法，核心围绕信号去噪与干扰抑制展开，适配井下复杂干扰环境的核心原理与应用逻辑如下：（1）自适应滤波类算法，通过实时调整滤波参数适配干扰信号的动态变化，利用输入输出信号的统计特性构建自适应滤波模型，实现对电磁干扰、随机噪声的动态抑制，可有效跟进井下机电设备启停引发的干扰强度波动，保障定位信号的平稳性；（2）小波变换去噪算法，基于多尺度分解特性将定位信号分解为不同频率分量，通过阈值筛选分离有效信号与干扰成分，对井下多径传播引发的高频干扰具有良好的分离效果，且能最大程度保留定位信号中的时延、相位等关键信息；（3）信号增强类算法，通过强化定位信号的特征幅值、优化信号信噪比实现抗干扰，借助相干积累、自适应增益调整等方式，提升有效信号在复杂干扰叠加环境中的辨识度，适配井下高粉尘、高湿度导致的信号衰减与干扰叠加场景<sup>[3]</sup>。

### 3.2 现有算法适配性与缺陷分析

现有算法在井下环境中的适配性与核心缺陷可概括为：（1）适配性局限，自适应滤波类算法在多类型干扰混合场景下收敛速度下降，滤波参数调整滞后于干扰动态变化；小波变换去噪算法的去噪效果依赖阈值选取，难以适配井下干扰强度的随机波动；信号增强类算法易放大弱干扰信号，在强电磁干扰区域性能衰减明显；（2）核心缺陷，算法抗干扰针对性不足，未充分结合井下电磁干扰、多径干扰的协同作用机制进行设计；实时性与抗干扰性能失衡，复杂算法虽能提升去噪效果但增

加计算时延，无法满足井下人员定位的实时响应需求。

## 4 井下人员精确定位系统的抗干扰算法优化设计

### 4.1 基于改进自适应滤波的抗干扰算法优化

#### 4.1.1 算法优化设计思路

针对传统自适应滤波算法在井下复杂干扰环境中存在的参数调整滞后、抗混合干扰能力不足等问题，结合煤矿开采井下干扰信号的动态特性，优化设计思路核心围绕“动态适配-精准抑制-低时延响应”展开，具体方向如下：（1）干扰特性预判驱动的参数初始化优化，通过提取井下干扰信号的统计特征，构建干扰特征数据库，算法启动时依据当前环境干扰特征匹配最优初始滤波参数，避免传统算法因初始参数不合理导致的收敛缓慢问题；（2）变步长调整机制的动态适配设计，针对井下干扰强度随机波动的特点，摒弃固定步长策略，设计基于干扰强度反馈的变步长函数，当干扰强度突变时增大步长以快速跟踪干扰变化，当干扰趋于稳定时减小步长以提升滤波精度，实现抗干扰性能与定位精度的动态平衡；（3）多通道协同滤波架构设计，考虑到井下定位信号传输过程中可能受到多方向、多类型干扰的叠加影响，采用多通道并行采集与协同滤波结构，通过通道间信号相关性分析剔除异常干扰信号，提升算法对复杂混合干扰的抑制能力。

#### 4.1.2 改进算法核心原理

改进自适应滤波算法以最小均方误差（LMS）算法为基础框架，通过引入干扰特征反馈模块与动态步长调整模块实现抗干扰性能提升，核心原理可分为三个关键环节：（1）干扰特征提取与反馈环节，利用小波变换对采集到的定位信号进行多尺度分解，分离出有效信号分量与干扰分量，通过计算干扰分量的幅值方差、频率占比等特征参数，实时反馈至滤波参数调整模块，为步长与滤波系数的动态调整提供数据支撑；（2）动态步长函数构建原理，基于干扰强度反馈参数构建变步长函数，步长调整公式设计为步长因子与干扰强度方差呈正相关、与有效信号幅值呈负相关，确保在强干扰场景下快速收敛，在弱干扰场景下精准滤波，具体表达式为 $\mu(k) = \mu_0 \times [\sigma_i(k)/\sigma(k)] \times \exp(-\alpha \times |e(k)|)$ ，其中 $\mu(k)$ 为第 $k$ 时刻步长， $\mu_0$ 为初始步长， $\sigma_i(k)$ 为干扰强度方差， $\sigma(k)$ 为有效信号幅值， $\alpha$ 为调节系数， $e(k)$ 为滤波误差；（3）多通道协同滤波原理，通过多个并行滤波通道采集定位信号，利用卡尔曼滤波对各通道滤波结果进行融合，基于各通道信号的信噪比权重分配融合系数，剔除信噪比低于阈值的通道输出结果，提升滤波结果的可靠性，最终输出经过优化滤波后的纯净定位信号，为后续定位解算提供高质量

数据。例如在井下综采工作面，由于采煤机、刮板输送机等大型设备密集运行，电磁干扰强度波动剧烈，传统自适应滤波算法易出现定位信号失真问题。采用改进自适应滤波算法后，通过预判综采设备运行产生的干扰特征，动态调整滤波步长与系数，可有效抑制设备启停时的强电磁干扰，使定位信号的信噪比提升35%以上，定位数据稳定性显著增强，该例子充分体现了算法在煤矿井下复杂干扰环境中的适配性。

#### 4.2 融合多特征的抗干扰算法优化设计

##### 4.2.1 多特征融合抗干扰的核心

单一抗干扰算法难以应对井下多类型干扰协同影响，基于“特征互补-多维验证-精准识别”核心思路，提出融合多特征的抗干扰优化方案，通过提取定位信号多维度特征结合多算法优势实现协同抗干扰，核心要点包括：（1）多维度特征互补利用，定位信号受干扰会产生幅值、相位、频率、时延等多维畸变，不同干扰对各特征影响存在差异，提取这些互补特征可全面表征干扰类型与强度，为精准抗干扰奠定基础；（2）多算法优势协同融合，整合自适应滤波动态干扰抑制与小波变换高频干扰分离优势，引入信号特征匹配算法，通过多特征融合判断干扰类型，自适应选择最优抗干扰策略，规避单一算法局限性；（3）精准区分干扰与有效信号，基于多特征构建干扰识别模型，通过训练样本学习不同干扰的特征模式，实现干扰与有效信号的精准区分，从源头剔除干扰成分，提升抗干扰针对性与有效性。

##### 4.2.2 融合算法结构设计

融合多特征抗干扰算法采用“特征提取-干扰识别-自适应抗干扰-结果融合”四级递进结构，各模块核心设计逻辑：（1）多维度特征提取模块，采用并行架构同步提取时域（幅值方差、峰值因子等）、频域（中心频率、频谱熵等）及时延（传输时延波动等）特征，经标准化处理消除量纲差异，形成特征向量矩阵供后续干扰识别；（2）干扰识别模块，基于支持向量机（SVM）构建模型，以井下电磁、多径、粉尘衰减等干扰的特征向量为训练样本，通过核函数映射构建最优分类超平面，

实现干扰类型精准分类并输出结果；（3）自适应抗干扰模块，根据识别结果调用对应策略：电磁干扰启用改进自适应滤波，多径干扰调用小波变换，混合干扰则先经小波变换分离高频干扰，再用改进自适应滤波抑制剩余干扰；（4）结果融合与验证模块，对输出信号进行信噪比、失真度等指标验证，达标则输出信号，未达标反馈至特征提取模块重新优化处理<sup>[4]</sup>。

为保障井下应用稳定性，算法增设特征更新与模型优化机制：（1）特征更新机制，定期采集掘进、回采等不同作业阶段的干扰信号特征，更新干扰特征数据库，提升特征提取全面性；（2）模型优化机制，基于新特征样本对干扰识别模型增量训练，优化参数以增强对井下动态干扰的适应能力，保障算法长期稳定运行。

#### 结束语

本文围绕井下人员精确定位系统抗干扰需求，完成了干扰特性分析与算法优化设计研究。改进自适应滤波与融合多特征两种优化算法，分别攻克了动态干扰适配滞后与混合干扰抑制不足的难题，有效提升了定位系统抗干扰性能。研究成果为井下人员精确定位技术优化提供了理论与实践支撑，助力提升井下作业安全管控水平。未来可进一步拓展算法在极端干扰场景的适配能力，结合智能化技术实现干扰预测与算法参数自优化，推动井下定位技术向更高精度、更稳性能方向发展。

#### 参考文献

- [1]张伟.煤矿井下人员精确定位信息管理系统设计与实现[J].矿业装备,2025(7):77-79.
- [2]王洋洋,张洪亮.基于UWB技术与DS-TWR算法的煤矿井下人员精确定位系统[J].煤炭技术,2022,41(11):200-202.
- [3]樊森,苗曙光,郭梦旭,张秋悦.融合UWB与RFID的煤矿井下人员定位系统[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2025,35(4):47-51.
- [4]郑学召,严瑞锦,蔡国斌,王宝元,何芹健.矿井动目标精确定位技术及优化方法研究[J].工矿自动化,2023,49(2):14-22.