 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i9.11748

Optimization and Precision Improvement of UWB Collaborative Positioning Algorithm for Underground Coal Mine Personnel

Changjiang Yang

Shaanxi Huadian Yuheng Coal and Electricity Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

In complex underground operational environments, UWB positioning is prone to deviation due to non-line-of-sight interference, with widespread signal coverage blind spots. This paper proposes an optimized collaborative positioning algorithm for mobile nodes that establishes a hierarchical cooperative networking structure based on mobile identification nodes, integrating the weighted least squares method with adaptive Kalman filtering for error suppression. Both theoretical derivations and field measurements demonstrate that this algorithm significantly improves positioning accuracy in mines and enhances the stability of position monitoring operations.

Keywords

coal mine safety; ultra-wideband positioning; collaborative positioning; NLOS suppression

煤矿井下 UWB 人员协同定位算法优化及精度提升

杨长江

陕西华电榆横煤电有限责任公司，中国 · 陕西 榆林 719000

摘　要

井下复杂作业场景下，UWB定位易受非视距干扰产生偏差，同时普遍存在信号覆盖盲区。对此本文提出移动节点协同定位优化算法，依托移动标识节点搭建分层协同组网结构，融合加权最小二乘法与自适应卡尔曼滤波算法实现误差抑制。理论推导与现场实测证明，该算法能够显著改善矿井定位精度，增强位置监测运行稳定性。

关键词

煤矿安全；超宽带定位；协同定位；NLOS抑制

1 引言

矿井作业现场工况条件严苛，巷道空间局促且线路弯折多变，金属支护构件、采掘装备与悬浮粉尘共同形成高动态复杂传播环境，大幅降低无线信号传输稳定性。智能矿山建设进程中，人员与移动设备的实时高精度位置侦测，是保障生产安全、开展应急调度的关键技术支撑。超宽带技术依托窄脉冲信号具备超高时间分辨率，相较常规射频定位技术，在多径干扰抵御与介质穿透性能上优势突出。但巷道界面反射遮挡、非视距传播效应、机电电磁扰动等干扰因素，会造成测距信号产生时延偏差，致使理想工况下的厘米级定位精度在井下实际应用中大幅下降。协同定位技术依托人员佩戴定位标签组建动态辅助网络，凭借扩充冗余观测数据提升系统覆盖范围与抗干扰能力，目前已成为该领域研究热点 [1]。本文依托现有理论成果，结合陕西地区煤矿现场工况，剖析非视距误差产生机制，搭建分层协同定位框架，引入自适应滤波算法，在保障定位响应速度的同时优化测算精准度。研究采用的试验数据与工况参数，均取自省内煤矿实际工程项目。

【作者简介】杨长江（1985–），男，本科，中国陕西榆林人，工程师，从事煤矿信息研究。

2 煤矿井下 UWB 定位误差源分析

2.1 NLOS 误差的产生机理

非视距误差是造成矿井定位准确度衰减的核心诱因。综采作业面与掘进巷道内，金属支护构件、皮带输送设备、液压支撑装置及煤尘集聚区域，均会对 UWB 脉冲信号产生遮挡损耗。定位标签与基准基站间直射传输链路中断时，接收信号仅能依靠绕射、反射方式完成传播，信号飞行时间测算结果相较真实数值出现正向偏差。

2.2 多径效应与巷道传播特性

矿井巷道呈现狭长密闭管状形态，内壁表面凹凸不均，且布设大量金属附属设施。UWB 信号在此类空间传播过程中，除直射传播路径外，还会经由巷帮、顶底板反复反射，生成密集多径信号集群。凭借超宽带固有时域分辨特性，该

技术可区分多数多径分量，但若反射信号与直射信号抵达时间差值小于脉冲宽度，信号叠加效应会偏移首径识别节点，进而产生固定测距偏差。标签与基站处于同一巷道截面且受防护网阻隔时，多径干扰引发的首径识别偏差，可将定位误差扩大一倍以上。同时巷道岩壁形成的镜面反射效应易催生测距虚镜像问题，算法易将反射链路判定为直射链路，最终输出偏差较大的位置解算结果，该问题在巷道岔口与转弯区段表现得最为明显。

2.3 工程应用中的系统误差

除无线信道干扰外，硬件设备自身非理想特性也会叠加作用，进一步拉低定位测算准确度。双向测距与到达时间差是 UWB 定位常用测算模式，能够降低设备时钟精准同步的约束条件，然而天线传输时延波动、晶振受温度影响产生频率偏移，以及基站布设坐标人工校准偏差，都会衍生固定残余测算误差。陕西银河煤业落地的 UWB 结合 AI 视觉感知的人员入侵电子防护项目调试数据显示，基站定位坐标标定偏差每增加 10cm，整体定位误差会扩大至原有数值的 2 至 3 倍。巷道内部温度梯度分布、粉尘浓度动态变化，会造成空间介质介电参数改变，使得电磁波传播速率发生偏移，最终带来持续性测距偏差。各类误差相互交织耦合，依靠单一修正手段无法实现有效优化，必须依托整体系统架构优化完成问题处置。

3 协同定位算法设计

3.1 分层协同定位架构

传统 UWB 定位体系沿用固定锚点搭配移动标签的双层架构，正常定位作业要求终端可同时接收三路及以上基站信号。矿井综采工作面跨度可达 200 至 300 米，受防爆安装标准与巷道空间限制，侧壁基站布设间距普遍维持 50 至 80 米，信号重叠覆盖范围偏小。人员行进至单点覆盖区域或巷道弯折地段时，极易出现定位信号丢失现象。

针对现存缺陷，本文搭建三级协同定位框架。底层为固定锚点层级，巷道沿线按最优间距布设 UWB 基准站点，为整套系统提供统一坐标基准。中层设置动态辅助节点，将作业人员佩戴的定位终端作为中继单元，能够稳定获取三路及以上基站信号的标签，可在测算周期内临时转化为移动基准节点，为周边盲区终端补充测距参照数据 [2]。顶层为目标定位层级，面向现场作业人员开展实时位置解算。

3.2 移动节点优先级与迭代解算策略

协同组网内的移动终端无法全部充当辅助基准节点，本文结合节点实时定位可靠程度，建立三级优先级判别体系。一级优先级节点可与至少三处固定基站维持视距传输，借助最小二乘算法即可精准求解自身坐标，定位可信程度最优，满足辅助锚点的选用标准。二级优先级节点仅可同两处固定基站建立通信链路，初始位置测算结果存在不确定性，依托周边一级节点补充测距约束能够优化定位数值，修正后的坐标可小范围为其余终端提供位置参照。三级优先级节点连通基站数量不足两个，该类节点的位置测算完全依托周边两类高优先级节点组成的协同测距网络，位置解算所需观测数据均取自移动参考节点，对算法抗干扰能力有着严苛要求。

3.3 NLOS 误差识别与补偿方法

协同定位运算过程里，精准判别单次测距链路的非视距状态，是保障权重分配科学有效的关键。本文构建信号能量与测距残差联合判别机制，以此识别链路传播特性。

设定标签节点 i 与参考节点 j 之间归一化测距残差表达式为 $\Delta d_{ij} = |d_{ij}^{measured} - d_{ij}^{estimated}|$，同步采集对应链路接收信号能量参数 E_{ij}。若 Δd_{ij} 超出判定阈值 Δ^{thr}，或是 E_{ij} 低于临界门限 E^{thr}，即可判定该测距链路处于 NLOS 状态，在后续加权求解过程中降低该组数据所占权重。

针对判定为 NLOS 的测距数据，依托现场标定所得经验修正模型完成偏差补偿。依据陕西矿区实测标定样本，井下场景中 NLOS 测距偏差 Δe 和实测距离 $d_{measure}d$ 满足二阶多项式拟合关联关系：

$$\Delta e = a_0 + a_1 \cdot d_{measure}d + a_2 \cdot d_{measure}d^2$$

公式内系数 a_0、a_1、a_2 采用最小二乘算法，结合设备遮挡、人员阻隔、巷道转角等典型工况拟合求取。经过补偿校正后的测距参数，重新纳入定位解算流程参与权重核算。

4 定位算法实现与精度提升策略

4.1 自适应扩展卡尔曼滤波

UWB 原始定位时序数据易受随机测量噪声、NLOS 突发干扰影响，产生数值突变现象。本文完成协同坐标解算后，引入自适应扩展卡尔曼滤波算法开展轨迹平滑优化。

EKF 状态方程选取匀速运动模型拟合井下人员移动特征，状态矢量涵盖三维空间坐标与运动速度分量，观测矢量取自协同算法输出的节点位置估算结果。相较于常规扩展卡尔曼滤波，本算法结合前序滤波残差统计特征，动态修正观测噪声协方差矩阵：

$$R_k = \alpha_k \cdot R_0, \quad \alpha_k = 1 + \beta \cdot (\| z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1} \| / \sigma_{nom})$$

式中 R_0 代表基准观测噪声协方差矩阵，β 为自适应调节系数，z_k 为当前观测数据，σ_{nom} 为标准残差均方差。当实测观测量与滤波预估值偏差过大时，系数 α_k 同步上调，矩阵 R_k 数值相应增大，以此弱化异常数据对状态迭代更新的影响，规避离群点造成的轨迹畸变。

4.2 动态加权多边定位

常规多边定位算法对全部观测数据采用统一权值分配，未考量各参考节点定位可靠程度的个体差异。本文选用加权最小二乘法求解坐标参数，权重数值综合三类核心要素联合判定，分别为参考节点与待测标签的视距传播可信度、参考节点自身定位标准差，以及节点相对空间几何构型。

权重计算公式如下：

$$w_{ij} = C_{ij} \cdot \sigma_{ref}^{(j)} / \gamma_{ij}$$

式中 C_{ij} 为 NLOS 判别单元输出的置信系数，取值区间限定在 [0,1]，$\sigma_{ref}^{(j)}$ 表征参考节点 j 的定位离散程度估值，γ_{ij} 代表几何精度因子，量化节点排布形态对定位误差的放大效应。

4.3 算法整体计算流程

整合各项设计方案，本文构建的协同定位算法整体运算步骤归纳如下：所有 UWB 节点开展双向测距运算，采集终端与固定锚点、相邻终端间的原始距离观测数据；依托信号能量、测距残差等实时信道参数，逐条判定链路非视距状态并完成可信度评级；针对判定存在非视距干扰的测距数据，套用误差修正模型完成数值补偿；以固定基站坐标为基准参照，逐层迭代求解所有节点初始位置参数；搭建加权最小二乘优化模型，依据动态权重参数对坐标结果做精细化校正；将优化后的位置时序数据导入自适应 EKF 模块做平滑降噪处理，输出最终定位坐标 [3]。数据预处理环节部署于移动标签终端本地完成，坐标迭代求解与滤波优化交由中心服务端或高算力边缘网关运行，整体架构划分为本地预处理、协同联合解算、全局滤波优化三个处理层级。

5 实验验证与工程对比分析

5.1 实验环境与测试方案

本次算法性能验证依托陕西地区典型矿井巷道工况开展，试验参数取自红柳林煤矿、韩家湾煤炭公司、银河煤业等多个矿区 UWB 定位实测工程样本。试验巷道采用标准矩形截面规格，巷道总长 180m，断面宽度 5.2m，高度 3.8m，巷壁采用混凝土喷射支护工艺，顶部布设金属锚固防护网。巷道侧壁错落安置 6 台搭载 DW1000 芯片的 UWB 定位锚点，站点平均布设间距 45m。测试阶段由试验人员佩戴定位终端，按照规划往返路线行进，同时采用井下激光测距设备与预设基准点位采集真实位置数据，用作精度比对依据。

5.2 对比算法与评价指标

研究设置三组对照方案完成算法性能评测，方案 A 采用常规三边定位算法，未搭载协同定位机制，运用等权最小二乘法完成坐标求解。方案 B 仅搭载协同定位框架，舍去自适应 EKF 滤波处理模块。方案 C 采用本文设计的全套算法体系。试验选取平均定位误差、极限误差与误差标准差作为量化评估指标。

5.3 定位精度对比

非视距干扰程度偏低的基站重叠覆盖区域内，方案 A 平均定位误差达到 0.32m，峰值误差为 0.75m，误差诱因主要为多径干扰引发的首径识别偏差。搭载协同组网架构的方案 B 将平均误差缩减至 0.24m，可见移动中继节点增补的测距约束，能够有效遏制单基站覆盖边界处的定位结果偏移。采用全套算法体系的方案 C 平均定位误差降至 0.20m，最大误差限值控制在 0.48m。相较方案 A，该方案平均定位误差降幅达 38%，误差标准差缩减 44%，证实协同定位机制与自适应滤波协同作用，可同步优化系统定位准确度与运行稳定性。本次实测效果可在实际矿井工况下稳定复现，证明该协同定位策略能够脱离仿真环境，具备落地工程应用的现实条件。

5.4 计算实时性与工程适用性

从运算实时性维度分析，基于 STM32F4 嵌入式主控芯片实测可得，本文算法单次完整定位周期运算耗时为 3.2ms。其中非视距判别与测距校正耗时 0.6ms，加权最小二乘坐标求解占用 1.1ms，EKF 滤波迭代更新耗时 0.8ms，剩余时长用于数据传输与节点协同信息交互。该运算耗时可充分适配井下人员定位系统 50Hz 的数据刷新标准。节点间协同信息依托 UWB 数据报文自定义拓展位完成交互传输，不会对系统并发承载能力产生明显干扰。参考陕西彬长矿业小庄矿人员定位系统优化实践成果可知，搭建层级化分级预警体系，形成监测研判、风险告警、应急处置的闭环管控模式，是提升井下安全生产管控效能的核心方式。本文算法有效改善定位精准度，能够为此类安全预警体系提供稳定性更强的基础位置数据源。

6 结语

井下巷道复杂工况会大幅制约 UWB 定位体系的测算精度与运行稳定性。本文系统剖析矿井非视距误差成因与多径传播规律，据此设计移动节点协同式三层定位优化算法。该算法运算负载小，能够适配实时定位业务运行标准，可为矿井人员高精度位置监测提供具备理论依据与落地价值的优化方案。后续研究将探究惯性导航等异构传感设备与 UWB 技术的融合定位模式，进一步增强强非视距干扰场景下的定位抗干扰性能，强化智能矿山安全管控技术保障水平。

参考文献

[1] 温贤培.煤矿井下UWB快速定位方法研究[J].煤矿安全,2025,56(12):26-32.DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.20251176.

[2] 董涛,赵超.基于UWB煤矿井下人员定位系统开发与应用分析[J].矿业装备,2025,(11):142-144.

[3] 杨鹏.UWB技术在煤矿精准定位与能效管理中的应用[J].能源与节能,2024,(11):94-96.DOI:10.16643/j.cnki.14-1360/td.2024.11.018.