

文章编号: 1671-251X(2025)04-0009-10

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025010046

面向矿山救援的 UWB 雷达人员定位研究现状及展望

郑学召^{1,2,3}, 马佳文^{1,2,3}, 黄渊^{1,2,3}, 李强^{1,2,3}, 任婧^{1,2}, 刘钰^{1,2}

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 国家矿山救援西安研究中心, 陕西 西安 710054;

3. 陕西西矿智通科技有限公司, 陕西 西安 710086)

摘要:超宽带(UWB)雷达穿透能力强,分辨率高,可穿透煤岩等非磁性矿井坍塌物探测并定位后方被困人员。介绍了 UWB 雷达定位原理及其在矿山救援中的应用。从雷达定位方法、动静态目标定位、单多目标定位 3 个方面系统梳理了 UWB 雷达人员定位技术的研究现状。指出目前该技术在矿山救援领域应用存在的问题:①在大厚度、非均匀、不连续介质环境中定位误差较大,有效探测距离有限。②非视距环境下,雷达回波信号较弱且杂波干扰显著,导致微动目标探测定位精度低,动态目标实时定位误差大。③多目标信号相互干扰和遮挡效应影响定位精度。对未来面向矿山救援的 UWB 雷达人员定位技术研究趋势作出展望:①通过构建跨模态信息融合模型、开发高适应性信息处理方法等优化 UWB 雷达定位系统,提升系统对矿井灾后环境的适应性。②改进动静态目标定位算法,结合贝叶斯网络或深度信念网络融合静态和动态目标特征,构建基于目标状态切换的综合定位模型,提升对动静目标综合定位的适用性。③改进 UWB 雷达回波处理算法,结合自适应波束成形技术、多输入多输出技术及优化的 K-means++或熵分析分层算法,有效区分多目标位置信息,并通过大量模拟实验检验其在复杂环境中的适应性和可靠性。

关键词:矿山应急救援; UWB 雷达; 人员定位; 动态目标定位; 多目标定位

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Current status and outlook of UWB radar personnel localization for mine rescue

ZHENG Xuezhao^{1,2,3}, MA Jiawen^{1,2,3}, HUANG Yuan^{1,2,3}, LI Qiang^{1,2,3}, REN Jing^{1,2}, LIU Yu^{1,2}

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Research Center of National Mine Rescue, Xi'an 710054, China;

3. Shaanxi Xikuang Zhitong Technology Co., Ltd., Xi'an 710086, China)

Abstract: Ultra-Wide Band (UWB) radar exhibits strong penetration capability and high resolution, enabling the detection and localization of trapped personnel behind coal-rock collapses in mine disasters. This paper introduces the principles of UWB radar localization and its applications in mine rescue operations. The UWB radar personnel localization technologies are systematically reviewed from three perspectives: radar localization methods, static/dynamic target localization, and single/multi-target localization. Key challenges in mine rescue scenarios are identified: ① significant localization errors and limited effective detection range in thick, heterogeneous, and discontinuous media; ② weakened radar echoes and severe clutter interference under Non-Line-of-Sight (NLOS) conditions, leading to low-precision micro-motion target detection and large real-time errors for dynamic targets; ③ signal interference and occlusion effects among multiple targets degrading

收稿日期: 2025-01-18; 修回日期: 2025-03-18; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174197); 陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBSF-101)。

作者简介: 郑学召(1977—), 男, 新疆焉耆人, 教授, 博士, 研究方向为应急技术与管理、矿山防灭火技术, E-mail: zhengxuezhao@xust.edu.cn。通信作者: 马佳文(2002—), 男, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 研究方向为事故消防与应急救援, E-mail: 617036392@qq.com。

引用格式: 郑学召, 马佳文, 黄渊, 等. 面向矿山救援的 UWB 雷达人员定位研究现状及展望[J]. 工矿自动化, 2025, 51(4): 9-18.

ZHENG Xuezhao, MA Jiawen, HUANG Yuan, et al. Current status and outlook of UWB radar personnel localization for mine rescue[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(4): 9-18.



扫码移动阅读

localization accuracy. Future research directions of UWB radar personnel localization technology for mine rescue operations are proposed: ① optimizing the UWB radar localization system by constructing cross-modal information fusion models and developing highly adaptive signal processing methods to enhance the system's adaptability to post-mining disaster environments; ② improving the applicability of combined static and dynamic target localization by developing hybrid localization algorithms that integrate Bayesian networks or deep belief networks to fuse static and dynamic target features and establishing state-switching-based comprehensive models; ③ improving UWB radar echo processing algorithms, combining adaptive beamforming technology, Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology, and optimized K-means++ or entropy-based hierarchical analysis algorithms, effectively distinguishing multi-target position information, and validating their adaptability and reliability in complex environments through extensive simulation experiments.

Key words: mine emergency rescue; UWB radar; personnel localization; dynamic target localization; multi-target localization

0 引言

近年来我国煤矿安全生产形势逐年变好,事故发生率和死亡人数已降至较低水平^[1],但我国矿井地质环境复杂,且开采深度逐年增加^[2],导致由瓦斯和冲击地压等因素引发的煤矿事故仍然不可避免^[3]。事故引发的巷道坍塌等给救援带来了极大的困难。在矿山灾害救援过程中,如何快速准确地定位被困人员是成功救援的关键。

在煤矿事故发生后巷道严重阻塞的情况下,传统救援技术是打通堵塞的巷道以接近被困人员,往往需要大量时间,且效率较低^[4]。垂直钻孔救援技术具有高效率、远距离等优势^[5]。该技术通过地面快速、精准钻进小直径生命保障孔,放入生命探测设备,确定井下被困人员及其所在位置,随后构建大直径救援孔,使用救援提升设备帮助人员脱困^[6]。在这一过程中,确定被困人员的具体位置极为关键。

矿山灾后环境复杂,且存在塌方风险,ZigBee、蓝牙、红外等传统定位技术易受环境干扰,通信距离有限,难以满足矿山救援的精确定位需求^[7]。刘耀波^[8]提出了一种红外与激光相结合的人员搜救定位技术,但红外线无法穿透障碍物,而激光仅能沿直线传播,在矿井灾后煤尘较多的环境下难以实现精确定位,限制了其在实际应用中的效果。张秀娟^[9]提出了一种基于标签卡和基站的井下人员定位系统,在多个煤矿测试中表现良好,但矿山发生重特重大事故后,基站损毁会直接影响标签卡的使用,限制了其在灾后复杂环境中的应用,且标签卡通常使用 2.4 GHz 及以上高频无线信号,在灾后环境中易被吸收和散射,导致信号强度衰减,进一步降低定位精度。谭文群^[10]提出了一种基于 ZigBee 的矿井人员无线定位系统,但在灾后复杂环境中定位误差较大,

定位距离不稳定。

与传统定位技术相比,超宽带(Ultra Wide Band, UWB)雷达定位技术^[11]因其卓越的穿透能力和强抗干扰性^[12],被广泛应用在城市反恐、医疗健康、地震、火灾等救援领域。在汶川地震救援行动中,救援人员应用麻省理工学院 2005 年开发的一款基于 UWB 雷达的救生设备,大大缩短了搜救时间,成功定位多名被困人员^[13]。2008 年以色列 Camero Tech 公司推出 Xaver800 穿墙雷达,能够定位 30 cm 墙体后 2~3 m 的人体目标,极大地提高了救援效率^[14]。中南大学研发的 UWB 雷达生命探测仪能够定位 36 cm 墙体后 20 m 内的人体目标^[15]。华诺星空系列雷达生命探测仪可精确定位 10 m 墙体后 0~1 m 的人体目标^[16]。在矿山救援领域,UWB 雷达因其穿透能力强、抗干扰性好、多径分辨能力强等特点,被应用于实现灾后障碍物后方被困人员精确定位。特别是在井下巷道大面积坍塌、基站严重损毁场景中,UWB 雷达定位技术可对被困人员进行精确定位,如孙慧玲^[17]利用 Matlab 中的时间自适应卡尔曼滤波定位算法与加权最小二乘定位算法计算目标节点坐标,通过追踪目标历史轨迹,可迅速确定被困人员所在位置。

本文介绍了 UWB 雷达定位技术的基本原理及其在矿山救援中的应用情况,从定位方法、不同状态和不同数量的人员定位 3 个方面梳理矿山救援领域 UWB 雷达人员定位研究现状,指出当前研究存在的问题,并展望未来的发展趋势。

1 UWB 雷达定位技术

1.1 UWB 雷达定位技术原理

在煤矿事故救援过程中,使用 UWB 生命探测雷达确定障碍物后方被困人员的具体位置时,雷达通

过发射和接收 UWB 脉冲信号来确定目标位置。这些信号频谱范围宽广, 且具有较高的频率及多路径传播能力^[18-19], 能够有效克服多径干扰和信号衰减, 提供较高的定位精度^[20-21]。雷达发射的 UWB 脉冲信号在传播过程中遇到目标(如被困人员)时发生反射, 产生回波^[22-23], 接收器随后捕捉到反射信号。对回波信息进行处理即可得到被困人员的位置信息^[24]。基本原理如图 1 所示。

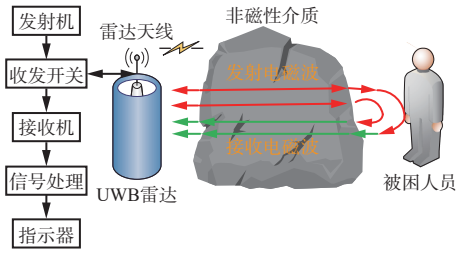


图 1 UWB 雷达定位基本原理

Fig. 1 Basic principle of UWB radar

由于矿井环境复杂, 回波信号中可能包含背景杂波和环境噪声等干扰信息, 为了提升定位的精确度, 需要对回波信息进行预处理。王明泽等^[25]提出了一种基于像素向量消除的穿墙雷达杂波抑制算法, 仿真结果表明, 该算法具有良好的有效性和鲁棒性, 能显著提升信噪比。陈焱博^[26]提出了一种基于联合熵值的穿墙雷达墙体杂波抑制算法, 实验结果表明, 该方法较熵值法、背景相消法、奇异值分解法能更有效地滤除杂波干扰信号。王冬霞等^[27]提出了一种基于双向长短记忆神经网络的回声和噪声抑制算法, 实验结果表明, 在非线性回声和非平稳噪声环境下, 该算法取得了较好的回声和噪声抑制效果。李慧等^[28]提出了一种基于变分模态分解和奇异谱分析的联合算法, 实验数据表明该算法可有效去除环境噪声对回波信息的影响。

对回波信息进行预处理后, 确定障碍物后方被困人员的具体位置主要采用基于信号传输时间测距的定位方法和基于天线阵列方向估计的定位方法^[29]。基于信号传输时间测距的定位方法主要有脉冲雷达测距和调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)雷达测距。脉冲雷达测距基本原理: UWB 雷达发射机产生一个高功率的电磁波脉冲, 通过天线发射出去。这些电磁波在传播方向上遇到目标时, 一部分电磁波被反射回去。雷达接收天线捕捉到反射电磁波, 即回波信号。通过记录 UWB 雷达发射和接收脉冲信号的时间^[30], 结合电磁波在空气中的传输速度, 得到被困人员与 UWB 雷达之间的距离^[31-32]:

$$d_p = Ct \quad (1)$$

式中: C 为电磁波传播速度; t 为信号传播时间。

与脉冲雷达测距不同的是, FMCW 雷达测距发射的是频率随时间变化的连续波。将发射的 FMCW 信号和接收的回波信号送入混频器进行处理, 得到差频信号, 随后通过测量差频信号的频率, 结合 FMCW 信号带宽可计算出目标与雷达之间的距离:

$$d_r = \frac{Cf_r}{2B} \quad (2)$$

式中: f_r 为差频信号频率; B 为 FMCW 信号带宽。

基于天线阵列方向估计的定位方法依赖于 UWB 天线阵列接收的信号相位差, 通过空间谱图或波束形成技术计算目标方向角^[33], 得到被困人员在灾后空间中的方向信息, 结合 UWB 雷达与被困人员之间的距离, 推算目标的具体位置^[34]。UWB 雷达相位法测角原理如图 2 所示。

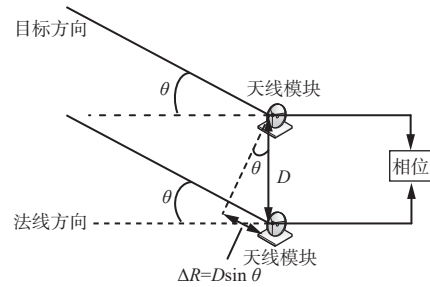


图 2 UWB 雷达相位法测角原理

Fig. 2 Phase-difference-based angle estimation in UWB radar systems

设一组线性天线阵列接收到的信号之间存在固定间距 D , 信号之间的相位差 $\Delta\phi$ 满足以下关系:

$$\Delta\phi = 2\pi f t = \frac{2\pi C t}{\lambda} = \frac{2\pi \Delta R}{\lambda} = \frac{2\pi D \sin \theta}{\lambda} \quad (3)$$

$$\sin \theta = \frac{\lambda \Delta\phi}{2\pi D} \quad (4)$$

式中: f 为雷达信号频率; λ 为雷达信号波长; ΔR 为路程差; θ 为目标方向角。

1.2 UWB 雷达定位技术在矿山救援中的应用

在矿山救援中, UWB 雷达定位技术展现了其在复杂环境下的显著优势^[35]。针对灾后坍塌的水平巷道, 救援人员可以部署 UWB 雷达系统, 凭借其强穿透能力探测到煤岩等非磁性介质后方被困人员的位置信息^[36]。在垂直钻孔救援过程中, 在施工小直径生命保障孔后, 将 UWB 雷达生命探测器深入井下, 实时获取障碍物后方被困人员的位置信息, 并通过无线或有线通信技术将探测信息传输至救援指挥中心, 利用探测结果确定目标的具体位置^[37], 然后施工大直径救援孔将被困人员安全提升至地面。应用场景如图 3 所示。

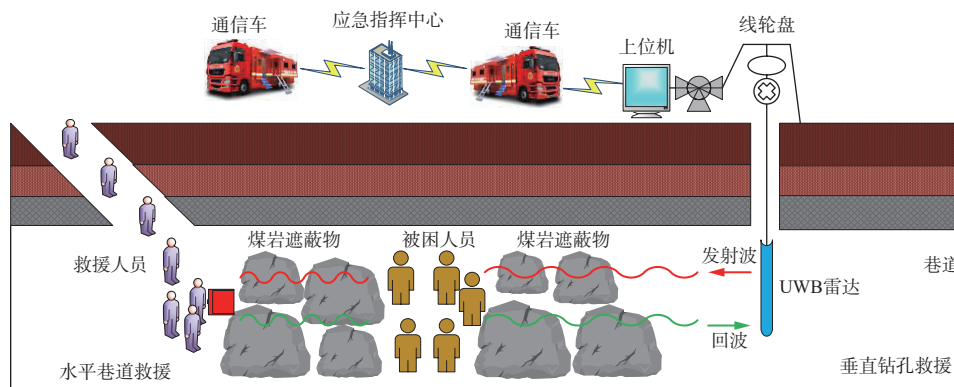


图 3 UWB 雷达定位技术的矿山救援应用场景

Fig. 3 Application of UWB radar positioning technology in mine rescue scenario

矿井灾后环境复杂,坍塌物材质的多样性、高浓度煤尘、非视距(Non Line of Sight, NLOS)条件等都会对定位信号产生干扰^[38]。传统的基于信号传输时间测距和基于天线阵列方向估计的定位方法在复杂环境中可能面临误差增大、多目标难以分辨等问题^[39]。此外,由于被困人员数量(单个或多个)及状态(静止或移动)不同,多个目标的信号之间会产生干扰,目标运动会导致信号波动,造成定位精度不高。为提高 UWB 雷达在矿井灾后环境中的人员定位精度,需要优化基于信号传输时间测距与基于天线阵列方向估计的定位方法,实现高精度定位。同时,需进一步研究针对不同数量或状态人员的定位方法,提升救援效率和成功率。

2 UWB 雷达定位技术研究现状

在矿山救援过程中,灾后坍塌环境的复杂性和不可预知性对救援行动构成了严峻挑战,精确定位被困人员的具体位置成为 UWB 雷达定位技术的主要研究内容。根据障碍物后方被困人员不同数量和状态,使用不同的定位方法来确定被困人员的具体位置。

2.1 UWB 雷达定位方法研究现状

2.1.1 基于信号传输时间测距的定位方法

根据雷达天线数量的不同,分为单发单收和单发多收。UWB 单发单收雷达系统仅使用 1 根发射天线和 1 根接收天线^[40]。该配置方式的优点是结构简单、成本低,适用于单目标检测和定位^[41]。但由于缺少多角度信息,其定位能力仅限于一维距离测量,难以实现复杂场景中三维定位或多目标分辨。UWB 雷达单发多收系统使用 1 根发射天线和多根接收天线,通常布置成一定几何阵列^[42-43]。M. Švecová 等^[44]使用 1 根发射天线与 4 根接收天线构建多静态雷达系统,经实验验证,该系统的目标定位误差在

31 cm 范围内。B. Yilmaz 等^[45]基于 1 根发射天线和 2 根接收天线的 UWB 雷达系统配置,提出了一种用于检测并成像障碍物后方移动目标的精确定位算法,通过数值场景模拟和实验验证了该算法能以较高的保真度精确定位障碍物后方的移动目标,适用于矿山灾后救援。

2.1.2 基于天线阵列方向估计的定位方法

Liu Jia 等^[46]提出了一种小型化 UWB 对映维瓦尔第天线阵列,结合混合扩散吸收超表面技术,实现了宽频带、低散射特性和高增益效果,实验结果表明该阵列在 4.5~50 GHz 范围内实现了-10 dB 阻抗带宽,最大增益达到 12.7 dBi,定位误差仅为 46 cm。J. P. Mathew 等^[47]提出使用规则四面体天线阵列对障碍物后方目标人员进行定位估计,实验结果表明该天线阵列定位误差低于 50 cm。B. Hanssens 等^[48]提出了一种基于 UWB 信道探测的定位框架,采用虚拟天线阵列和高分辨率 RiMAX 算法扩展,从 UWB 探测数据中提取传播路径的几何参数,并结合 Kim-Parks 算法对多个目标位置进行聚类估计,实验结果表明该框架在 NLOS 场景中实现了 0.90 m 的平均定位精度。

2.2 UWB 雷达人员定位研究现状

在矿山救援中,对于障碍物后方被困人员不同数量及状态使用不同的定位方法,全面掌握每个被困人员的位置信息,对于指导救援行动、提高救援效率具有重要意义。

2.2.1 静止和动态人体目标定位

对于不同状态被困人员的定位侧重点有所不同。静止目标的定位主要应用于被困人员长时间未移动的情况,UWB 雷达通过分析目标反射信号或回波的反射特征来定位静止目标。静止目标的雷达回波信号特征较稳定,可以通过较简单的信号处理和定位方法进行精确定位。梁福来等^[49]通过 UWB 多

输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)生物雷达技术,优化雷达参数和信号处理算法,精确定位30 cm混凝土墙后的静止人体目标。Z. Slimane等^[50]采用一种基于正交频分复用的UWB雷达穿墙定位静止人体目标,通过短时傅里叶变换结合背景杂波抑制技术,从检测波形中提取出人体目标的位置信息,实验结果表明该方法能够有效定位20 cm混凝土墙后静止人体的位置。Yan Kun等^[51]提出了2种用于定位准静态被困人员的方法,分别为基于单点观察的单站雷达模式和基于多点观察的多站雷达模式,以提高UWB单发单收系统的定位精度,实验结果表明,这2种方法均可定位到实际场景中的准静态被困人员,定位误差小于3%。

与静止人体目标定位不同的是,动态目标的定位侧重于解决NLOS条件下目标运动导致信号波动,从而影响定位精度的问题,且需要考虑目标的运动轨迹。传统测距方法要加入运动模型(如卡尔曼滤波、粒子滤波等),以实时更新目标的位置和速度。何永平等^[52]提出了一种基于UWB的动态目标定位方法,通过2次粒子滤波处理UWB雷达采集的原始数据,有效抑制了NLOS误差的影响,在NLOS严重的环境中定位精度可达0.29 m,较雷达定位系统提供的三边测量定位算法提高48.21%。王红尧等^[53]利用UWB无线模块采集距离信息,通过改进粒子群优化-长短期记忆网络模型进行动态目标轨迹预测,平均定位误差为30 mm,较传统粒子群优化-长短期记忆网络模型提升24%,可以提供精确的被困人员移动轨迹,提高救援效率。Zhang Xiaona等^[54]提出了一种高精度动态目标定位方法,利用经验模态分解对噪声信号进行处理,提取噪声能量作为主模,进而去除高频信号并构建低频信号,实现滤波和去噪。结合GNSS/SLAM建立动态目标定位模型,实现高精度目标定位,实验结果表明该方法的位置姿态误差小,速度稳定,位置信息较传统定位方法更接近动态目标的实际运动轨迹。

2.2.2 单目标和多目标人体定位

在使用UWB雷达对障碍物后方被困人员进行定位的过程中,针对不同数量的被困人员,定位任务的侧重点因目标信号的数量及信号处理的难易程度而有所不同。单目标定位主要关注抑制背景噪声,以减小其对定位精度的影响;而多目标定位则侧重于解决多个目标信号之间的相互干扰问题。本文从单目标与多目标定位2个方面介绍UWB雷达对于不同数量人体目标定位的研究现状。

单目标定位只需处理1个目标的信号,因此在

实际应用中所需算法通常较简单。矿山灾后环境中介质厚度大、噪声变化大等会影响UWB雷达定位精度。Ji Pengfei等^[55]提出了一种基于改进容积卡尔曼滤波器(Cubature Kalman Filter, CKF)的组合定位方法,采用Levenberg-Marquardt算法优化UWB雷达的位置求解,引入自适应因子实时更新测量噪声协方差矩阵,并加入衰落因子以抑制滤波发散,实验结果表明,与扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)、无迹卡尔曼滤波器和CKF算法相比,该方法在NLOS场景下的定位精度分别提高了25.2%, 18.3%, 11.3%。

多目标定位通常需要同时处理多个信号源,去定位多个被困人员的具体位置。由于目标数量多,不同目标的信号可能会发生干扰,使得定位精度下降,所需定位算法的复杂度显著增加。尤谍等^[56]提出了一种多目标自适应差分进化算法,通过自适应调整参数来优化UWB雷达定位,实验结果表明,无论是在有干扰还是无干扰条件下,该算法较传统算法有效提高了多目标定位精度,并减小了NLOS误差。雷挺^[57]提出了一种基于增强型几何滤波的方法,用于处理多目标定位问题,该方法通过聚类 and 几何滤波的融合,在NLOS环境下能够同时定位3个目标,在目标信号间相互干扰和环境变化时表现出较好的鲁棒性。Zhang Jingwen等^[58]提出一种基于排列熵和Kmeans++聚类的目标识别和定位方法,以确定环境中目标的数量和位置,实验结果表明该方法能够成功定位多个人体目标,其改进的波束成形技术显著降低了多目标信号间的干扰,使平均方向估计误差低于2°,同时结合距离估算的定位误差小于2%。Xu Zihan等^[59]提出了一种基于UWB-MIMO雷达的多径识别方法,通过构建多径回波模型,并结合距离-多普勒拓扑特征,实现多目标精确定位,通过实验和电磁仿真验证了该方法在复杂环境下能够有效定位NLOS目标,提升了UWB雷达在多目标定位场景中的应用性能。

3 矿山救援中UWB雷达定位技术存在的问题

1) 矿井灾后复杂环境对UWB雷达信号传播和定位性能产生显著影响。尽管UWB雷达具有强穿透能力和较高抗干扰性,但在实际应用中,由于矿井灾后环境介质复杂,坍塌体结构布局随机,UWB电磁波传播衰减严重^[60],难以处理回波信号,导致雷达有效探测距离无法满足救援需求,尤其是在矿山大面积塌方等复杂场景下,雷达无法覆盖整个区域,从而影响被困人员的搜救效率。此外,缺乏针对灾后

UWB 发射卡微弱信号的增强手段,导致部分被困人员佩戴的发射卡持续发出的信号无法被充分利用;同时也缺少定位系统损毁瞬间位置信息的有效存储与恢复机制,影响救援决策。传统的 UWB 雷达定位系统在应对大厚度、非均匀、不连续介质环境时,定位误差大,探测距离有限,且难以通过历史数据进行定位轨迹回溯。亟需针对多种矿井灾变环境优化定位系统与信号处理方法,提升定位精度和探测范围。

2) 不同状态人员的精准定位在矿井灾后环境中仍面临显著挑战。尽管目前 UWB 雷达定位技术已有一定进展,但在矿井灾后环境中,现有定位算法受限于信号波动、散射和衰减,导致雷达回波信号较弱、杂波干扰显著、信号质量下降,微动目标探测定位精度低,动态目标实时定位误差大。此外,雷达回波识别模型无法根据静止与动态目标的特征自动切换定位算法模块,UWB 雷达在混合场景中的适应性与可靠性较低。因此,亟需进一步优化动态目标精准定位方法,并构建动静结合的综合定位模型,以实现在矿井灾后环境中对不同状态的人员进行精准定位。

3) 在不同数量的人员定位方面,信号干扰和遮挡效应造成定位精度不高。尽管现有定位方法通过优化自适应滤波和改进识别算法取得了一定进展,但在矿井灾后环境中,多目标信号混叠、目标信号间的相互干扰和雷达信号遮挡效应导致信号清晰度和目标的可识别性不高。特别是在大厚度煤岩介质后,当目标距离较近或位于同一径向时,现有方法难以有效分离并提取每个目标的位置信息,定位精度较低。需进一步研究针对不同数量目标的定位方法,提升定位精度和算法的鲁棒性;开发更高效的信号分离与提取技术,以满足在矿井灾后环境中对于多个人体目标的高精度实时定位需求。

4 UWB 雷达定位技术在矿山救援中应用展望

随着雷达回波处理、定位算法、多源信息探测等技术的发展,UWB 雷达定位技术在矿山灾后救援中的应用更加普遍。为更好地适应灾后复杂环境,提高定位精度和救援效率,还需在未来的研究中不断完善和发展 UWB 雷达定位技术。研究展望如图 4 所示。

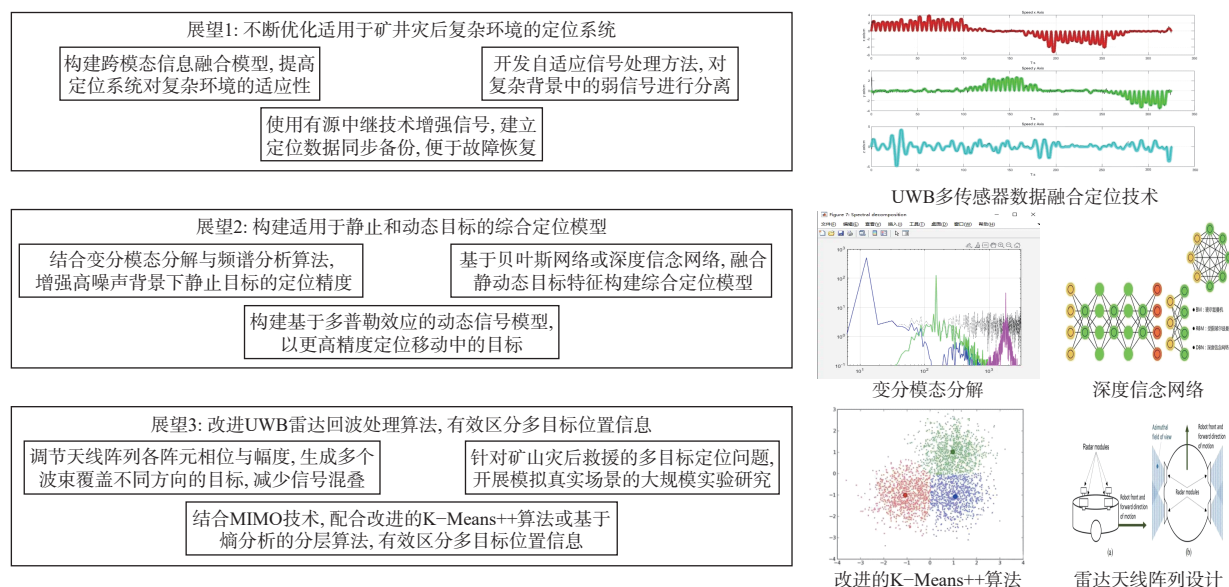


图 4 UWB 雷达人员定位技术研究展望

Fig. 4 Research prospects of personnel localization technology based on UWB radar

1) 不断优化定位系统,提升 UWB 雷达对矿山灾后环境的适应性。针对不同类型的灾变环境,整合 UWB 雷达、光学传感器、地质雷达等多种数据源,构建跨模态信息融合模型,从而增强定位系统对不同灾变环境的适应能力。利用煤尘浓度、坍塌材料特性等环境信息,动态调整 UWB 雷达信号传播模型,提高定位方法在复杂环境中的可靠性。使用有源中继技术,结合放大-转发或解码-转发策略,增强灾后 UWB 发射卡微弱信号的可探测性。建立定位

数据同步与备份机制,将关键位置信息存储至地面或云端,以支持系统损毁时刻的位置恢复,提高救援效率。采用高斯脉冲或修正的 Hermite 脉冲来优化雷达信号的时域特性,提高雷达穿透力与分辨率,同时适当改进雷达系统的发射功率和接收器灵敏度,以提升探测范围。此外,为应对复杂背景中的信号干扰,通过小波变换与多尺度分解技术,结合自适应滤波方法,开发出适应性更强的信号处理方法,从复杂背景中分离弱信号并提取有效的位置信息。通过

在真实矿井环境中开展人员定位测试,检验定位方法在高噪声和复杂环境中的精确性,推动矿山灾后定位技术的实际应用。

2) 改进 UWB 雷达定位方法,构建适用于静止和动态目标的综合定位模型。对静止目标启用生命体征提取算法,对于动态目标则采用运动轨迹预测算法进行处理,实现连续定位。特别地,研究基于呼吸、心跳等生命体征信号的定位方法,结合改进变分模态分解与频谱分析算法,增强高噪声背景下静止目标的定位精度。使用 EKF 或粒子滤波方法,整合动态人体目标的位置与速度信息,实现运动轨迹连续预测。分析目标运动对回波特征的影响,构建基于多普勒效应的动态信号模型,以提升移动目标的定位精度。进一步研究能够根据目标状态切换定位算法的模块,基于贝叶斯网络或深度信念网络,融合静止与动态目标特征,构建综合的目标定位模型,提升 UWB 雷达在混合场景中的适应性与可靠性。

3) 不断完善 UWB 雷达信号处理技术,有效区分多目标位置信息。利用自适应波束成形技术,通过调节雷达天线阵列各阵元的相位与幅度生成多个波束,覆盖不同方向的目标,有效降低信号混叠的影响。引入 MIMO 技术,配合改进的 K-means++ 算法或基于熵分析的分层算法,有效区分多目标位置信息。针对矿山灾后救援的多目标定位问题,进一步开展模拟真实场景的大量实验研究。通过构建多样化的实验场景与数据集,评估定位方法在不同人体目标数量、复杂介质和高干扰环境下的适应性与可靠性,提升 UWB 雷达人员定位系统在实际救援中的应用效果。

UWB 雷达定位技术在矿山灾后救援中展现出巨大的应用潜力。随着定位方法的不断优化、系统架构的持续完善、信号处理技术的进一步发展,UWB 雷达在复杂多变的矿山灾后环境中的适应性与可靠性将得到进一步提高,为被困人员精准定位与救援决策的合理制定提供关键技术支持。

参考文献(References):

- [1] 武强,涂坤,曾一凡,等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625-1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [2] 张兴润,潘博杰,张永斌,等. 复合动力灾害钻孔卸压和高效抽采一体化防治技术[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-10[2025-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240816.1806.002.html>.
ZHANG Xingrun, PAN Bojie, ZHANG Yongbin, et al. Integrated prevention and control technology of unloading pressure from boreholes and high-efficiency extraction for compound power disasters[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-10[2025-01-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240816.1806.002.html>.
- [3] 周全超,刘玲,李继升,等. 基于多种解析法和数值法求解巨厚砂岩水文地质参数[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(增刊 1): 174-182.
ZHOU Quanchao, LIU Ling, LI Jisheng, et al. Solving hydrogeological parameters of extremely thick sandstone based on various analytical methods and numerical methods[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S1): 174-182.
- [4] 文虎,侯宗宣,郑学召,等. 深井救援技术与装备研究现状和发展趋势[J]. 工矿自动化, 2024, 50(5): 14-22, 35.
WEN Hu, HOU Zongxuan, ZHENG Xuezhao, et al. Current research status and development trends of deep well rescue technology and equipment[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(5): 14-22, 35.
- [5] 邹祖杰,凡东,刘庆修,等. 矿山地面大直径钻孔救援提升装备研制[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 160-165.
ZOU Zujie, FAN Dong, LIU Qingxiu, et al. Research and development on rescue lifting equipment of large diameter borehole at mine ground[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 160-165.
- [6] 肖明国,张彪,林中湘,等. 矿山钻孔垂直救援技术的思考及发展趋势[J]. 煤矿安全, 2024, 55(4): 245-250.
XIAO Mingguo, ZHANG Biao, LIN Zhongxiang, et al. Considering and development trend of vertical rescue technology for mining drill hole[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(4): 245-250.
- [7] 佟海滨,陈腾峰,邓庆绪,等. 用于矿山等极端环境中的高精度定位算法[J]. 金属矿山, 2020(1): 193-199.
TONG Haibin, CHEN Tengfeng, DENG Qingxu, et al. High-precision localization approach for harsh environments like mining[J]. Metal Mine, 2020(1): 193-199.
- [8] 刘耀波. 基于红外探测的人员搜索及定位技术研究[J]. 矿山测量, 2020, 48(5): 31-35, 58.
LIU Yaobo. Research on personnel search and orientation technology based on infrared detection[J]. Mine Surveying, 2020, 48(5): 31-35, 58.
- [9] 张秀娟. 井下人员定位系统电子标签与读卡器的设计[J]. 中国煤炭, 2010, 36(2): 61-64.
ZHANG Xiujian. Design of underground personnel

- positioning system's electronic tag and card-reader[J]. *China Coal*, 2010, 36(2): 61-64.
- [10] 谭文群. 基于 ZigBee 技术的煤矿井下人员定位考勤系统的设计[J]. *煤矿安全*, 2007, 38(9): 54-56.
TAN Wenqun. Design of mine personnel location attendance system based on ZigBee technology[J]. *Safety in Coal Mines*, 2007, 38(9): 54-56.
- [11] 李元绪. 基于改进深度置信网络的 UWB 无线定位方法[J]. *计算技术与自动化*, 2024, 43(2): 162-169.
LI Yuanxu. UWB wireless positioning method based on improved deep belief network[J]. *Computing Technology and Automation*, 2024, 43(2): 162-169.
- [12] 马光辉, 陈莉伟. 基于 UWB 的隧道内人员定位系统设计研究[J]. *微型电脑应用*, 2024, 40(9): 40-44.
MA Guanghui, CHEN Liwei. Design and research of personnel positioning system in tunnel based on UWB[J]. *Microcomputer Applications*, 2024, 40(9): 40-44.
- [13] 李鑫. UWB 脉冲雷达呼吸信号检测算法研究[D]. 深圳: 中国科学院深圳先进技术研究院, 2013.
LI Xin. Research on respiratory signal detection algorithm of UWB pulse radar[D]. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [14] 丁一鹏, 库彦龙. 穿墙雷达人体动作识别技术的研究现状与展望[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(4): 1156-1175.
DING Yipeng, SHE Yanlong. Research status and prospect of human movement recognition technique using through-wall radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(4): 1156-1175.
- [15] 赵锐, 梁步阁, 杨德贵, 等. 穿墙雷达成像的墙体参数自适应预估算法[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(5): 133-136.
ZHAO Rui, LIANG Buge, YANG Degui, et al. Wall parameters self-adaptive estimation algorithm for through-the-wall radar imaging[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(5): 133-136.
- [16] 赵允信, 姚海飞, 李佳慧, 等. 超宽带雷达生命探测技术研究[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(9): 178-186.
ZHAO Youxin, YAO Haifei, LI Jiahui, et al. Research on ultra wideband radar life detection technology[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(9): 178-186.
- [17] 孙慧玲. 基于 UWB 技术的煤矿井下人员精确定位系统探究[J]. *矿业装备*, 2024(6): 129-131.
SUN Huiling. Research on accurate positioning system of underground personnel in coal mine based on UWB technology[J]. *Mining Equipment*, 2024(6): 129-131.
- [18] 郑学召, 丁文, 黄渊, 等. 不同领域下超宽带雷达探测呼吸心跳信号研究综述[J]. *雷达学报(中英文)*, 2025, 14(1): 204-228.
ZHENG Xuezhao, DING Wen, HUANG Yuan, et al. A review of UWB radar detection of respiration and heartbeat signals in different scenarios[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(1): 204-228.
- [19] 师贞鹏. 分布式穿墙雷达节点自定位技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
SHI Zhenpeng. Node self-localization technology research of distributed through-the-wall radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [20] 姚善化, 杜斌. 矿井圆形隧道中电磁波传播特性分析[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(4): 88-91.
YAO Shanhua, DU Bin. Analysis on propagation features of electromagnetic wave in mine circular type roadway[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(4): 88-91.
- [21] 申伟光. 基于 UWB 技术的煤矿井下无线定位系统[J]. *煤矿安全*, 2018, 49(10): 131-134.
SHEN Weiguang. Underground wireless location system based on UWB technology[J]. *Safety in Coal Mines*, 2018, 49(10): 131-134.
- [22] 文虎, 周博, 郑学召, 等. UWB 雷达在矿山钻孔救援中的应用研究[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(6): 88-94.
WEN Hu, ZHOU Bo, ZHENG Xuezhao, et al. Research on the application of UWB radar in mine drilling rescue[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(6): 88-94.
- [23] 郑学召, 丁文, 黄渊, 等. 不同场景下 UWB 雷达探测呼吸心跳信号研究现状[J/OL]. *雷达学报*: 1-25 [2025-01-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1030.TN.20240923.1546.004.html>.
ZHENG Xuezhao, DING Wen, HUANG Yuan, et al. The current research status of UWB radar detection of respiration and heartbeat signals in different scenarios[J]. *Journal of Radars*: 1-25 [2025-01-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1030.TN.20240923.1546.004.html>.
- [24] 梁啸, 叶盛波, 宋晨阳, 等. 基于分布式穿墙雷达的多目标自动检测方法[J]. *雷达学报(中英文)*, 2025, 14(1): 28-43.
LIANG Xiao, YE Shengbo, SONG Chenyang, et al. Automatic multitarget detection method based on distributed through-wall radar[J]. *Journal of Radars*, 2025, 14(1): 28-43.
- [25] 王明泽, 李蔚, 马俊伟, 等. 基于像素向量消除的穿墙雷达杂波抑制算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(3): 827-833.
WANG Mingze, LI Wei, MA Junwei, et al. Clutter suppression algorithm based on pixel vector elimination in through-the-wall radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(3): 827-833.
- [26] 陈焱博. 超宽带穿墙雷达墙体杂波抑制与快速成像方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
CHEN Yanbo. Research on wall clutter suppression and

- fast imaging method of ultra-wideband through-wall radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.
- [27] 王冬霞, 张伟, 于玲, 等. 基于 BLSTM 神经网络的回声和噪声抑制算法[J]. 信号处理, 2020, 36(6): 991-1000. WANG Dongxia, ZHANG Wei, YU Ling, et al. Echo and noise suppression algorithm based on BLSTM neural network[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(6): 991-1000.
- [28] 李慧, 包腾飞, 顾冲时. 复杂强噪声下坝体微弱振动响应信号提取[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(6): 1326-1336. LI Hui, BAO Tengfei, GU Chongshi. Signal extraction for weak vibration response of A dam in complex strong noise[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(6): 1326-1336.
- [29] 魏岚焘, 崔丽珍, 包图雅. 改进型 DS-TWR 的 UWB 煤矿井下定位方法研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(4): 87-91. WEI Lantao, CUI Lizhen, BAO Tuya. Research on UWB underground location method based on improved DS-TWR[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2023, 23(4): 87-91.
- [30] 肖竹, 王勇超, 田斌, 等. 超宽带定位研究与应用: 回顾和展望[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 133-141. XIAO Zhu, WANG Yongchao, TIAN Bin, et al. Development and prospect of ultra-wideband localization research and application[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 133-141.
- [31] 陈伟. 基于 UWB 技术的煤矿精确定位系统[J]. 煤矿机械, 2023, 44(5): 177-180. CHEN Wei. Coal mine precise positioning system based on UWB technology[J]. Coal Mine Machinery, 2023, 44(5): 177-180.
- [32] 陈伟民, 李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1251-1265. CHEN Weimin, LI Cunlong. Radar-Based displacement/distance measuring techniques[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(9): 1251-1265.
- [33] 李铭, 侯艳丽, 苏佳. OFDM 系统中一种低复杂度的 TOA 和 DOA 联合估计算法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(10): 155-163. LI Ming, HOU Yanli, SU Jia. A low-complexity joint TOA and DOA estimation in OFDM system[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(10): 155-163.
- [34] 王麒铭. 基于脉冲超宽带雷达的非接触式生命体征探测信号处理[D]. 成都: 电子科技大学, 2024. WANG Qiming. Signal processing of non-contact vital signs detection based on pulse ultra-wideband radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [35] 敬芳菲. 基于超宽带雷达的生命体征提取技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022. JING Fangfei. Vital signs extraction technology based on UWB radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [36] 郑学召, 黄渊, 孙梓峪, 等. 不同煤岩及混合介质中 UWB 电磁波传播衰减特性试验研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-10[2025-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240717.1235.001.html>. ZHENG Xuezhaoh, HUANG Yuan, SUN Ziyu, et al. Experimental study on attenuation characteristics of UWB electromagnetic wave propagation in different coal rocks and mixed media[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-10[2025-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240717.1235.001.html>.
- [37] 文虎, 刘盛铠, 郑学召, 等. 基于钻孔救援的 UWB 雷达波传输衰减研究及展望[J]. 工矿自动化, 2023, 49(4): 42-49. WEN Hu, LIU Shengkai, ZHENG Xuezhaoh, et al. Research and prospect of UWB radar wave transmission attenuation based on borehole rescue[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 42-49.
- [38] 蔡雪婷. 矿井 NLOS 场景移动目标定位跟踪算法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023. CAI Xueting. Research on the algorithm for locating and tracking moving targets in NLOS scenarios in mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [39] 李圣令, 刘克中, 陈聪, 等. 一种复杂环境下 UWB 测距误差预测方法[J]. 导航定位学报, 2024, 12(1): 85-96. LI Shengling, LIU Kezhong, CHEN Cong, et al. A UWB ranging error prediction method in complex environments[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2024, 12(1): 85-96.
- [40] YANG Xiaqing, FAN Shihao, GUO Shisheng, et al. NLOS target localization behind an L-shaped corner with an L-band UWB radar[J]. IEEE Access, 2020, 8: 31270-31286.
- [41] 韩学松. 主动毫米波成像馈源天线研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. HAN Xuesong. Research on active millimeter wave imaging feed antenna[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [42] SHEN Jing, XIE Jinhua, YU Xuewei, et al. Phased array radar system design based on single-send and multiple-receive for LSS-UAV target[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1920(1). DOI: [10.1088/1742-6596/1920/1/012074](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1920/1/012074).
- [43] FORTES J, ŠVINGÁL M, PORTELEKY T, et al. Positioning and tracking of multiple humans moving in

- small rooms based on a one-transmitter-two-receiver UWB radar configuration[J]. *Sensors*, 2022, 22(14). DOI: [10.3390/S22145228](https://doi.org/10.3390/S22145228).
- [44] ŠVECOVÁ M, KOCUR D, DEMČÁK J, et al. Through-the-floor localization of a static person by a multistatic UWB radar[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(3): 825-831.
- [45] YILMAZ B, ÖZDEMİR C. A detection and localization algorithm for moving targets behind walls based on one transmitter-two receiver configuration[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, 59(6): 1252-1259.
- [46] LIU Jia, XU Chengxiang, YU Hang, et al. Design of a miniaturized ultrawideband and low scattering antipodal Vivaldi antenna array[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1). DOI: [10.1038/S41598-021-92051-Z](https://doi.org/10.1038/S41598-021-92051-Z).
- [47] MATHEW J P, NOWZARI C. ReLoki: a light-weight relative localization system based on UWB antenna arrays[J]. *Sensors*, 2024, 24(16). DOI: [10.3390/S24165407](https://doi.org/10.3390/S24165407).
- [48] HANSSENS B, PLETS D, TANGHE E, et al. An indoor variance-based localization technique utilizing the UWB estimation of geometrical propagation parameters[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(5): 2522-2533.
- [49] 梁福来, 李浩楠, 祁富贵, 等. UWB MIMO 生物雷达多静止人体目标成像方法研究[J]. *雷达学报*, 2016, 5(5): 470-476.
- LIANG Fulai, LI Haonan, QI Fugui, et al. Imaging of multiple stationary humans using a UWB MIMO bio-radar[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(5): 470-476.
- [50] SLIMANE Z, ABDELHAFID A. Through wall stationary human target detection and localization using OFDM-UWB radar[J]. *Frequenz*, 2016, 70(5/6): 245-251.
- [51] YAN Kun, WU Shiyong, FANG Guangyou. Detection of quasi-static trapped human being using mono-static UWB life-detection radar[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(7). DOI: [10.3390/APP11073129](https://doi.org/10.3390/APP11073129).
- [52] 何永平, 刘冉, 付文鹏, 等. 非视距环境下基于 UWB 的室内动态目标定位[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(8): 46-49, 54.
- HE Yongping, LIU Ran, FU Wenpeng, et al. Indoor dynamic object positioning in NLOS environment based on UWB[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(8): 46-49, 54.
- [53] 王红尧, 房彦旭, 吴钰晶, 等. 基于 IPSO-LSTM 的井下动目标位置预测实验研究[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(3): 393-403.
- WANG Hongyao, FANG Yanxu, WU Yujing, et al. Position prediction of underground moving targets in mines based on IPSO-LSTM[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(3): 393-403.
- [54] ZHANG Xiaona, ZHANG Shufang, LI Qiaosong, et al. Combined GNSS/SLAM-based high accuracy indoor dynamic target localization method[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 2021. DOI: [10.1155/2021/8380869](https://doi.org/10.1155/2021/8380869).
- [55] JI Pengfei, DUAN Zhongxing, XU Weisheng. A combined UWB/IMU localization method with improved CKF[J]. *Sensors*, 2024, 24(10). DOI: [10.3390/S24103165](https://doi.org/10.3390/S24103165).
- [56] 尤谍, 陈勇, 张修伟, 等. 基于多目标自适应 DE 算法在 UWB 中的应用研究[J]. *微型电脑应用*, 2023, 39(9): 54-56, 67.
- YOU Die, CHEN Yong, ZHANG Xiuwei, et al. Research on the application of multi-objective adaptive DE algorithm in UWB[J]. *Microcomputer Applications*, 2023, 39(9): 54-56, 67.
- [57] 雷挺. 基于 UWB 信号的室内精准鲁棒定位方案及其算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- LEI Ting. Research on indoor accurate robust localization programme and its algorithm based on UWB signal[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [58] ZHANG Jingwen, QI Qingjie, CHENG Huifeng, et al. A multi-target localization and vital sign detection method using ultra-wide band radar[J]. *Sensors*, 2023, 23(13). DOI: [10.3390/S23135779](https://doi.org/10.3390/S23135779).
- [59] XU Zihan, GUO Shisheng, CHENG Jiahui, et al. Multi-domain features-based NLOS target localization method for MIMO UWB radar[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(23): 29314-29322.
- [60] 郑学召, 孙梓峪, 王宝元, 等. 超宽带雷达波在煤体中的传输衰减特性[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(5): 765-771.
- ZHENG Xuezhao, SUN Ziyu, WANG Baoyuan, et al. Transmission attenuation characteristics of ultra-wideband radar waves in coal[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(5): 765-771.