

文章编号: 1671-251X(2024)07-0012-09

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2024060024](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2024060024)

面向矿山救援的 UWB 雷达生命信息识别研究现状与展望

郑学召^{1, 2, 3}, 马扬^{1, 2, 3}, 黄渊^{1, 2, 3}, 蔡国斌^{1, 2, 3}, 丁文^{1, 2, 3}

(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)雷达可穿透煤岩等非磁性介质, 实现坍塌物后人员生命信息探测。因矿井环境复杂, 加载生命体征信号的UWB雷达探测回波易被环境噪声、杂波信号干扰, 且人体目标信息识别困难。介绍了UWB雷达生命探测系统原理及其在矿山救援中的应用。从UWB雷达生命信息提取、动静态人体目标识别和生命体量化3个方面, 对UWB雷达生命信息识别研究现状进行了归纳。指出目前UWB雷达生命探测技术在矿山救援领域应用存在的问题: ①针对井下坍塌环境中非平稳信号与环境噪声等的滤除方法研究较少。②针对运动(或微动)目标姿势、行为、生命状态等信息的提取与表征方法有待改进, 人体生命信息识别模型尚未完善且模型间特征关联性较低。③针对多目标产生的“混叠”问题缺乏解决方案。对面向矿山救援的UWB雷达生命信息识别研究方向作出展望: ①不断优化多类矿山灾变环境的噪声与杂波自适应滤除方法。②构建适用于矿山救援领域的人体生命信息识别模型。③进一步提高对矿井遮蔽物后多目标的量化能力。④深入探究UWB雷达最佳探测频段确定方法。

关键词: 矿山救援; 生命信息识别; UWB 雷达; 杂波滤除; 生命信息提取; 目标识别; 生命体量化

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Research status and prospects of UWB radar life information recognition for mine rescue

ZHENG Xuezhao^{1,2,3}, MA Yang^{1,2,3}, HUANG Yuan^{1,2,3}, CAI Guobin^{1,2,3}, DING Wen^{1,2,3}

(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 can penetrate non-magnetic media such as coal and rock to detect life information of personnel after collapse. Due to the complex mining environment, UWB radar loaded with vital sign signals is prone to interference from environmental noise and clutter signals. It is difficult to recognize human subject information. This paper introduces the principle of UWB radar life detection system and its application in mine rescue. This paper summarizes the current research status of UWB radar life information recognition from three aspects: UWB radar life information extraction, dynamic and static human object recognition, and life quantification. This paper points out the current issues with the application of UWB radar life detection technology in the field of mine rescue. ① There is limited research on filtering methods for non-stationary signals and environmental noise in underground collapse environments. ② The extraction and

收稿日期: 2024-06-07; 修回日期: 2024-07-15; 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); 陕西省科协青年人才托举计划项目(20240205)。

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。

引用格式: 郑学召, 马扬, 黄渊, 等. 面向矿山救援的 UWB 雷达生命信息识别研究现状与展望[J]. 工矿自动化, 2024, 50(7): 12-20.

ZHENG Xuezhao, MA Yang, HUANG Yuan, et al. Research status and prospects of UWB radar life information recognition for mine rescue[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(7): 12-20.



扫码移动阅读

representation methods for posture, behavior, life status, and other information of moving (or micro moving) objects need to be improved. The human life information recognition model is not yet perfect and the feature correlation between models is low. ③ There is a lack of solutions to the "overlapping" problem caused by multiple objects. This paper proposes the prospects for the research direction of UWB radar life information recognition for mine rescue. ① It is suggested to continuously optimize noise and clutter adaptive filtering methods for multiple types of mine disaster environments. ② It is suggested to construct a human life information recognition model suitable for the field of mine rescue. ③ It is suggested to further improve the quantification capability of multi-object after mine shelter. ④ It is suggested to conduct depth exploration of the method for determining the optimal detection frequency band for UWB radar.

Key words: mine rescue; life information recognition; UWB radar; clutter filtering; life information extraction; object recognition; life quantification

0 引言

随着国家对矿山安全重视程度的不断提高,我国矿山灾害事故发生率逐年降低,近10年来矿山事故发生次数与死亡人数总体呈下降趋势^[1],但安全生产仍面临诸多挑战。由于矿山地质结构复杂^[2-3],冲击地压、冒顶、透水、煤与瓦斯突出事故比例不断攀升^[4]。一旦发生此类事故,易造成巷道坍塌堵塞、区域性火灾,增大救援难度^[5]。研究如何对被困人员进行精准而高效的营救,是矿山救援的关键所在^[6]。

矿山救援方式分为水平巷道救援与垂直钻孔救援。常规的水平巷道救援采用直接透巷、新掘绕巷等方式,施工大直径救援通道^[7]穿过坍塌段,存在工程量大^[8]、易引起二次坍塌等问题,当掘进工作受阻时,无法有效探测遮蔽物后方的生命迹象。垂直钻孔救援是通过施工小直径钻孔,放入生命信息探测设备,确认被困人员位置后施工大直径钻孔进行救援^[9]。矿山垂直钻孔救援技术在2002年美国宾夕法尼亚州奎溪煤矿透水、2010年智利圣何塞铜矿坍塌、2015年我国山东平邑石膏矿坍塌等事故中成功应用。现阶段实施垂直钻孔救援过程中,易受煤岩地质的影响,导致终孔偏离目标或造成二次坍塌形成遮蔽物,隔绝被困人员,使大多数生命信息探测设备出现测量偏差,甚至无法满足探测要求^[10]。主要原因是基于音视频技术与红外技术的生命信息探测设备无法实现穿透探测^[6],基于声波技术的生命信息探测设备在遇到非均介质时衰减较大,难以适应恶劣的救援环境。超宽带(Ultra-Wide Band, UWB)雷达作为一种新兴的探测技术,因其穿透性强、分辨率高、抗干扰性好等特点而引起广泛关注。目前UWB雷达主要应用于反恐斗争、智慧医疗、自然灾害等领域,在矿山救援领域鲜有报道,主要原因是矿山灾变环境复杂,生命体征信号容易被环境噪声、杂

波信号淹没,且UWB雷达难以准确探测和识别遮蔽物后方人体状态、被困人员数量等信息。因此,需要进一步开展面向矿山救援的UWB雷达生命信息识别研究。

本文介绍了UWB雷达生命探测系统及其工作原理,从生命信号提取、人体目标识别和生命体量化3个方面梳理UWB雷达生命信息识别现状,指出当前研究存在的问题,并展望其发展趋势。

1 UWB雷达生命探测系统

1.1 UWB雷达生命探测原理

UWB雷达生命探测原理是基于人体目标对雷达回波产生的多普勒效应^[11],当UWB雷达发射脉冲信号穿透砖混、煤岩等非磁性障碍物照射人体目标时,若干个脉冲重复间隔形成慢时间维度,由于人体目标来回走动或微动(包括肢体微动、呼吸、心跳等),反射回波信号将占据多个距离向维度单元,使雷达采集的回波频率相较于发射频率发生偏移,经数据处理单元解析出回波的频率、相位、幅值等偏移量^[12],即可提取心跳、呼吸等信息,实现对被困人员的非接触式探测。

UWB雷达生命探测系统主要由脉冲信号发生模块、回波采集模块、数据处理模块、天线模块组成^[13],如图1所示。救援人员使用上位机通过WiFi等方式发出工作指令,经ARM处理器控制现场FPGA和低速DSP发送指令至纳秒脉冲发生器产生UWB脉冲信号,同时使采样脉冲发生电路触发采样门电路开始采集数据。UWB脉冲信号通过发射天线进行耦合处理,穿透遮蔽物发射至灾变区域,经过目标反射被接收天线捕捉。回波信号经过变窄和放大处理后,再经过高速ADC处理,由FPGA与DSP完成采样,最终将UWB雷达回波信号回传至上位机,完成对井下人体目标的探测。

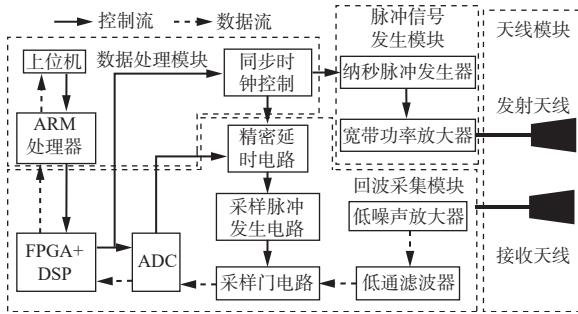


图 1 UWB 雷达生命探测系统组成

Fig. 1 Composition of UWB radar life detection system

1.2 UWB 雷达生命探测系统在矿山救援中的应用

进行矿山水平巷道救援时,若遭遇无法疏通的煤岩遮蔽物,可利用UWB雷达搜寻遮蔽物后方的被困人员。进行垂直钻孔救援时,可在地面施工小直径钻孔,向内部署UWB雷达探测器,通过有线与无线传输方式将探测信息传输至救援人员和应急指挥中心。一旦确定被困人员的位置,随即施工大直径钻孔,将被困人员安全提升至地面。现场应用如图2所示。

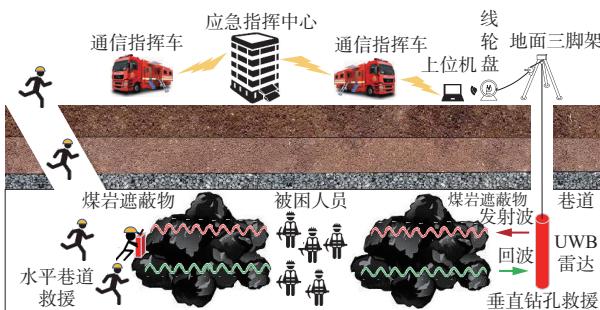


图 2 UWB 雷达生命探测系统现场应用

Fig. 2 Field application of UWB radar life detection system

在实际救援场景中,UWB雷达回波除了所需的目标回波外,还包含静态遮蔽物杂波、直达波、雷达设备间的干扰信息等^[14]。由于人体生命体征信号(尤指呼吸、心跳信号)具有微弱性,探测结果容易受到环境干扰信息、雷达性能、探测距离、探测目标状态等多因素的影响^[15],无法有效识别人体目标。为提升遮蔽环境下识别并提取生命体征信息的准确度,需对UWB雷达生命信号提取、人体目标识别及生命体量化技术进行研究。

2 UWB 雷达生命信息识别现状

矿山灾害事故发生后,无法疏通的坍塌环境阻碍救援行动的开展,检测遮蔽物后方人体目标的生命体征信号为UWB雷达生命信息识别的主要研究内容。通过滤除井下杂波提取生命体征信息,利用UWB雷达传感器对不同坍塌体介质下不同状态人体目标的生命体征进行检测、分析与量化,进一步获

取生命体的状态信息、数量信息等。

2.1 UWB 雷达生命信号提取

2.1.1 回波信号杂波滤除技术

UWB雷达回波信号的杂波滤除结果直接影响生命体征信号的提取、识别与量化结果。若直接分解掺杂遮蔽物杂波、灾变环境噪声的回波信号,计算繁杂且不易找到最优解,甚至可能导致后续产生误判。因此,需对雷达回波信号进行杂波滤除,以高效获取生命体征信息^[16]。目前雷达回波信号杂波滤除方法主要有滤波器滤除法、统计分析方法等。

滤波器滤除法是通过调解特定滤波器的阈值来滤除特定的频率成分或噪声等干扰信号。Y. S. Yoon 等^[17]通过在雷达天线阵列上增设空间滤波器,显著减少了由实心墙、混凝土砌块墙反射引起的杂波分量。R. Solimene 等^[18]分析了墙体与人体的回波反射阈值,提出了一种熵值滤波器来滤除墙体等遮蔽物的干扰,模拟仿真显示基于熵准则方法重构的目标轮廓更清晰、更接近现实,杂波抑制效果明显优于其他方法。滤波器滤除法的关键是快速高效地获得最优阈值,但该方法依赖大量的数据分析验证。此外,固定设计的滤波器面对动态变化的信号环境时无法适应输入信号特性的变化,杂波滤除效果不理想。

随着统计分析方法的发展,更多学者选择采用奇异值分解、经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)、小波变换等算法对杂波和噪声干扰进行处理。C. H. Lin^[19]利用EMD将时域信号分解为具有特定频率和幅值的分量,再重构生命体征信号,以达到滤除杂波的目的。康守强等^[20]为了避免EMD算法的模态混叠现象,采用变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)算法分解回波信号,并对得到的模态函数矩阵进行奇异值分解,求解奇异值及奇异值熵,有效提高了信息获取精度。王炜^[21]提出了一种融合小波变换与滤波器的信号预处理方法,通过比较软阈值与硬阈值的去噪效果,得出软阈值方法抑制噪声效果显著,且去噪后信号与原始信号在光滑度上相似,无附加振动。在实际应用中,小波阈值去噪适合消除原始信号中的白噪声,且白噪声占比越高,去噪效果越好。

上述基于EMD、小波变换等的统计分析方法已广泛应用于杂波滤除方面,但存在计算复杂度高、依赖大量训练、对数据分布敏感等缺陷,还需进一步研究优化方法。

2.1.2 生命体征信号提取技术

呼吸率、心率是生命健康程度最客观的体现。呼吸、心跳带动胸腔往复运动的信号可近似为周期

性正弦信号。UWB雷达生命探测技术通过分析雷达与胸腔间距离变化的信号特征,分解出呼吸、心跳信号,可高效掌握被困人员的生命状态信息,如图3所示。

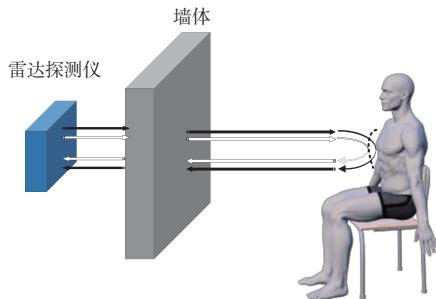


图3 雷达探测人体呼吸、心跳信号

Fig. 3 Radar detecting respiration and heartbeat signals

根据信号处理形式,生命体征信号提取技术可分为信号滤波与信号分解。基于传统信号滤波的生命体征信号提取主要是采用不同滤波器,配合优化算法来提高UWB雷达生命体征信号提取能力。张杨^[22]提出了基于时域线性累加和自适应干扰抵消技术的干扰抑制算法,使用单发收雷达穿透0.12 m墙体,成功检测到墙后3 m的人体呼吸信号。F. Khan等^[23]采用平均滤波器去除回波信号中的杂波,利用快速傅里叶变换将信号转换至频域后提取人体呼吸信号,再使用陷波滤波器提取心跳信号,但当呼吸谐波与心跳谐波重叠时,心跳信号的提取可能会完全失效。基于信号分解的生命体征信号提取方法是将预处理后的信号分解为不同的子信号,再提取呼吸信号。Liang Xiaolin等^[24]提出采用短时傅里叶变换来获取信号,使用基于集合经验模态分解(Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)的频率累计法估计呼吸频率,实验表明该方法能有效提取人体呼吸信号,解决了基于信号滤波方法无法处理动态信号的问题。

目前,基于信号滤波和信号分解方法可有效提取呼吸信号,但对于心跳信号的提取精度还有待提高。由于心跳微弱,其信号通常会受呼吸谐波与杂波干扰^[25]。此外,由于人体呼吸与心跳频率相近(呼吸频率为0.15~1 Hz,心跳频率为0.9~1.6 Hz),很难采用常规的带通、高通滤波器分离出心跳信号。D. R. Morgan等^[26]将直流耦合与块均值去除相结合,提出了一种呼吸谐波自适应消除算法,有效降低了呼吸谐波对微弱心跳信号提取的影响。为消除四肢、躯干等部位活动对心跳信号提取的影响,F. Khan等^[27]提出了一种基于生命信号的当前和先前频谱统计计算法,并将运动检测与生命信号检测相结合,提出了一种基于自相关的人体部位运动检测方法,有效提高

了对运动状态中心跳信号的提取精度。S. K. Kai等^[28]通过伪二维包络经验模态分解方法去除UWB雷达杂波,再利用能量函数第一谷峰方法确定兴趣时间区域,并根据能量函数的峰谷提取特征时间指数(Feature Time Index, FTI),利用EEMD将FTI的慢时间信号分解为若干个本征模态分量(分为高频杂波、低频呼吸和心跳信号)。分别在不同状态下探测呼吸和心跳频率:在正常呼吸状态下,呼吸和心跳的峰值频率分别为0.25 Hz(1 min呼吸15次)和1.15 Hz(1 min心跳69次);在屏气状态下,呼吸信号非常弱,频率为0.17 Hz(1 min呼吸10次),心跳频率为1.33 Hz(1 min心跳80次);在屏气15 s和呼吸45 s的状态下,呼吸和心跳频率分别为0.22 Hz(1 min呼吸13次)和1.22 Hz(1 min心跳73次)。实验数据与人体胸部伪模型数据相符。该方法不仅有效滤除了雷达杂波信号,还能高效检测出易忽略的小能量信号,且优化了正常呼吸与屏气状态下对呼吸和心跳频率的提取精度。

2.2 UWB雷达人体目标识别

对遮蔽物后方的人体进行静态和动态识别,是矿山救援的关键一环。全面掌握被困人员状态,对实现精细化救援、提高救援效率具有实际意义。

2.2.1 静止人体识别技术研究现状

对于静止人体目标的识别,重点是获取雷达回波中人体胸腔运动产生的信号,并分离呼吸和心跳信号。M. S. Nixon等^[29]、V. C. Chen等^[30]从不同波段进行人体目标识别实验,将天线发射功率调制到4.5 mW时,可提取30.48 m外静止状态的人体呼吸和心跳信号,天线发射功率提高至22 mW时,成功穿透30 cm厚混凝土墙并探测到静态卧姿人体的呼吸和心跳信号。路国华等^[11]研制了基于UWB的穿墙雷达探测仪,成功穿透30 cm厚墙体检测到人体生命信号。Zhang Zhu等^[31]、Li Zhao等^[32]提出了同时估计废墟瓦砾结构与生命体征信息算法和自适应杂波消除算法,使用400, 270 MHz双频UWB雷达,成功穿透2 m厚砖和钢筋混凝土板组成的碎石结构,探测到距雷达3 m处的静止人体目标信号。

2.2.2 动态人体识别技术研究现状

与静止人体识别方法不同的是,动态人体目标识别聚焦于对四肢摆动等较大幅度信号特征的提取。P. V. Dorp等^[33-34]通过最小二乘法拟合最小化模拟模型和真实人体运动参数,并最小化模拟模型和实际测量值间的差异估计参数,提出了一种人体运动模型,可准确识别并可视化生成墙体后运动的人体目标。Wang Yazhou等^[35]采用基于载波的收发

器和基于 FPGA 的 UWB 雷达处理时域与频域信号, 增强了 UWB 雷达穿墙探测多目标的性能。Ren Lingyun 等^[36]采用状态空间法处理步行人体的 UWB 雷达信号, 通过实验证明了短时状态空间法在低信噪比环境中能准确识别运动状态下的人体躯干与双脚。M. C. Tang 等^[37]提出了一种基于自主和相互注入锁定雷达架构的生命体征检测系统, 减少了运动时身体伪影对生命体征信号检测的影响。在此基础上, Wang Fukang 等^[38]增加了杂波效应消除电路, 提高了对不同运动幅度下人体生命体征的检测性能, 有利于在实际救援中准确研判被困人员的生命状态。

2.3 UWB 雷达生命体量化

明确遮蔽物后方人体数量是矿山救援的主攻方向, 对救援行动的开展具有重要意义。本文分别从单目标与多目标识别 2 个方面介绍 UWB 雷达生命体量化研究现状。

2.3.1 单目标识别

人体目标具有多散射点的特性, 目前针对单目标的探测方法大致分为 2 种: ① 通过相似性度量方法, 实现扩展目标在距离向维度的点目标化。② 基于雷达回波和时间-距离-多普勒图像, 采用人工标注或机器学习进行目标检测。

夏林林等^[39]采用重现量化分析方法对回波信号进行分析, 通过实验识别出 12 cm 厚砖墙后方为单目标还是非单目标。张杨等^[40]提出了一种基于波形匹配的 UWB 雷达人体识别方法, 将信号幅值和离散系数相结合, 对探测区域内有无人体或单双人体目标进行识别, 如图 4 所示, 并开展了多次穿透 30 cm 厚砖墙实验, 识别准确率为 88.9%, 但当砖墙厚度达到 2 m 时, 回波信号中的生命体征信息不明显, 影响目标识别准确率。

罗丁利等^[41]通过比较分析雷达回波的人体数据对应的多帧多普勒时频图谱, 提取了目标频谱的归一化幅度和、多普勒谱线数、多普勒谱宽标准差等典型特征, 采用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类器, 能有效鉴别单人或多人目标, 且平均识别率大于 90%。

2.3.2 多目标识别

穿透遮蔽物的多目标识别技术一直是救援的难点, 主要原因: ① 多目标距离向相距较近或方位角有一定重叠时, 近端目标由于遮蔽或拖尾等原因, 容易对远端目标产生“遮蔽效应”, 使雷达无法有效分离多目标信息^[42]。② 当距离向多目标相距较远时, 远端目标容易被背景噪声淹没, 造成目标漏判, 无法准确识别全部目标^[43]。

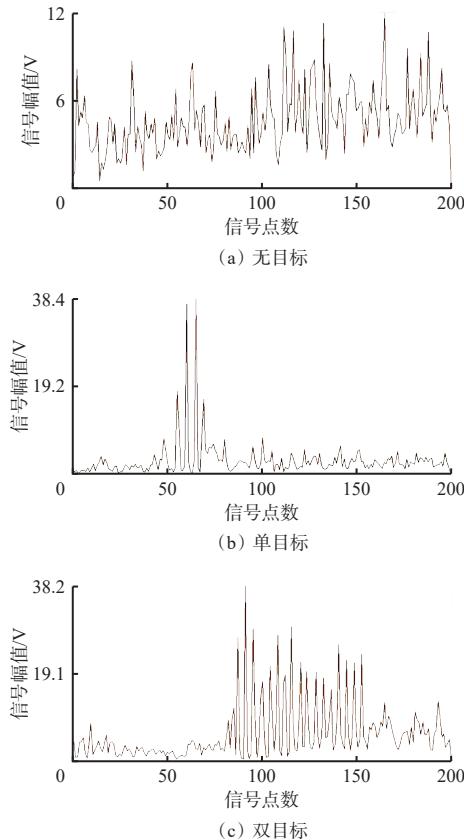


图 4 不同目标数量回波信号^[40]

Fig. 4 Echo signals with different numbers of objects^[40]

在多目标识别方面, 陈光等^[44]搭建了不同种类的 24 cm 厚砖墙来模拟废墟救援环境, 通过频谱分析、时域自适应滤波及生命体呼吸信号提取方法, 成功使用 UWB 雷达识别出墙后的多个目标。优化识别算法是提高多目标探测能力的有效手段之一。N. V. Rivera 等^[45]提出了聚类算法与多重信号分类算法, 使用 UWB 雷达成功探测到多个目标的生命体征信息。薛慧君等^[46]将小波变换算法与熵算法相结合, 采用小波熵识别算法分析了不同距离点信号经小波分解后的各尺度能量分布复杂度, 实验证明该算法显著提高了遮蔽环境下对多目标生命体识别的准确度。Ren Lingyun 等^[47]针对 UWB 雷达提出了一种基于对数方法的相位算法, 并成功在室内环境中识别出不同距离的多目标生命特征, 将误差降至 2.85%。胡志鹏^[48]设计了一种基于步进频连续波信号模型的 UWB 雷达系统, 采用 8 发 8 收的多输入多输出(Multiple-in Multiple-out, MIMO)形式, 成功穿透 22.5 cm 厚的实心混凝土砖墙, 探测到距雷达 1.5, 2 m 的 2 个人体目标信号。

随着 UWB 雷达硬件电路集成化程度的提升, 杂波信号滤波技术、生命信号提取方法、人体动静态识别与目标生命体量化技术也向着复杂、高效的方

向发展,为实现基于UWB雷达的生命体精确探测提供技术支撑,对矿山高效救援具有实际意义。

3 存在的问题

1) 在矿山灾变环境下杂波滤除方面,现有雷达探测场景大多集中于地面环境,穿透介质以木质、砖混结构为主,针对井下坍塌环境中非平稳信号与环境噪声等的滤除方法研究较少。微弱的生命体征信号容易淹没在背景杂波信号中,且现有算法可能会引入新的干扰,导致生命体征信息识别结果出现偏差,亟需针对多类矿井灾变环境,研究杂波滤除方法并进行有效性论证。

2) 在矿山救援领域人体生命体征信息识别方面,目前关于静止人体目标的生命体征识别技术研究已有一定成果,但针对运动(或微动)目标姿势、行为、生命状态等信息的提取与表征方法还有待改进。由于缺乏穿透大厚度、非均匀、不连续及多种类煤岩介质的人体动静态识别实验研究,人体生命信息雷达回波关键表征参数与生命信息识别模型之

间的映射关系尚不清晰,面向矿山救援领域的雷达回波数据库与生命信息识别模型尚未完善,难以满足不同工况下的救援需求,且模型参数之间特征关联性较低,直接影响生命体征信息识别的准确度与可靠性。

3) 在矿井坍塌环境下人体数量识别方面,目前研究者通过优化自适应滤波法、改进识别算法等手段,有效提高了对多目标生命体征信息识别的准确度。但因缺乏对大厚度煤岩介质后多目标识别实验的研究,当面对因多个目标距离较近或位于同一径向距离而可能产生的“混叠”现象时,可能无法同时分离并提取多目标生命体征信息,有待进一步研究。

4 展望

随着雷达信号处理、数字信号处理、多传感器数据融合等技术的发展,UWB雷达探测技术在矿山救援领域的应用将更加广泛和深入。由于矿井坍塌环境复杂多变,为满足救援需求,还需不断完善UWB雷达生命信息识别技术,研究展望如图5所示。

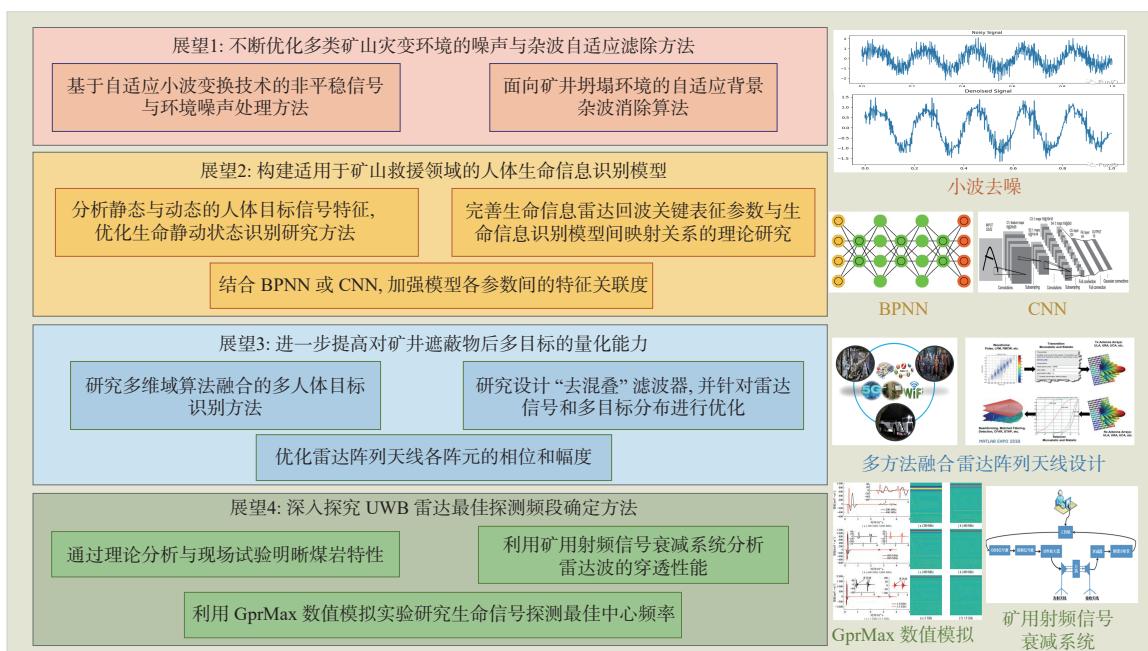


图5 基于UWB雷达生命信息识别的研究展望

Fig. 5 Research prospect on UWB radar life information recognition

1) 不断优化多类矿山灾变环境的噪声与杂波自适应滤除方法。通过解析穿透煤岩介质的人体生命体征雷达回波信息特征值,结合多尺度分析技术,深入研究面向矿井坍塌环境的小波变换去噪特性,构建基于自适应小波变换技术的非平稳信号与环境噪声处理方法。完善UWB雷达杂波抑制理论,综合利用滤波器滤除法、VMD算法和智能模式分类算法,研究面向矿井坍塌环境的自适应背景杂波消除算

法,借助大数据、深度学习、神经网络等新一代信息技术,提升系统对多种环境噪声与背景杂波的滤除能力。

2) 构建适用于矿山救援领域的人体生命信息识别模型。深入分析静态与动态人体目标信号特征,通过开展原地踏步、缓慢行走和变速运动的人体目标探测实验,大量提取健康、虚弱、濒危等状态下人体的生命体征数据集,优化静态与动态人体生命信

号特征提取方法。通过搭建灾变环境、开展仿真模拟实验等明晰煤岩特性与雷达波衰减特性,完善生命信息雷达回波关键表征参数与生命信息识别模型间映射关系的理论研究,构建适用于矿山救援的人体生命信息识别模型。使用融合遗传算法的贝叶斯正则反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)建立面向矿山救援环境的生命信息模型。结合深度信念网络(Deep Belief Networks, DBN)或卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)模型,加强模型各参数间的特征关联性,降低耦合性,提高模型对人体生命信息识别的泛化能力与准确度。

3) 进一步提高对矿井遮蔽物后多目标的量化能力。比较不同间距的多人体目标与雷达回波信号间的映射关系,研究多维域算法融合的多人体目标识别方法,为穿透井下遮蔽物提取多目标生命信息提供技术支撑。通过分析雷达回波的多目标“混叠”特性,研究“去混叠”滤波器设计方法,并针对UWB雷达信号和多目标分布进行优化,提升多目标生命信号的分离效果。通过自适应算法优化调整UWB雷达阵列天线各阵元的相位和幅度,以形成多个波束指向不同的方向,进一步分离“混叠”信号,提高对多目标的探测精度与救援效率。

4) 深入探究UWB雷达最佳探测频段确定方法。目前不同频段UWB雷达波在不同厚度及不同种类煤岩介质中的穿透探测性能尚未明确,不同频段的人体反射波幅值与煤岩体厚度的对应关系尚不清晰,导致难以在矿井坍塌环境中确定最佳的生命探测频段。对此,需通过理论分析与现场试验明晰煤岩特性,利用矿用射频信号衰减系统分析雷达波的穿透性能,确定不同频段的UWB雷达与坍塌体物理属性(介电常数、电导率、磁导率等)、坍塌体厚度和探测距离间的映射关系;研究不同频段雷达对人体生命信息的响应特性,利用GprMax数值模拟实验,研究UWB雷达探测生命信号最佳中心频率的确定方法,结合最优的穿透探测频段信号,确定适用于矿井坍塌环境的最佳生命信息探测频段,以提高复杂环境下的生命信息识别性能。

5 结语

从UWB雷达探测原理和实际应用场景出发,介绍了UWB雷达系统,分别从生命信号提取、人体目标识别和生命体量化3个方面对UWB雷达生命信息识别技术研究现状进行了归纳梳理。尽管目前基于UWB雷达的非接触式生命信息探测技术迅速发

展,促进了矿山救援向多元化发展,但为了更好地满足实际救援需求,还应不断优化面对不同灾变环境的噪声与杂波自适应滤除方法,构建适用于矿山救援的生命信息识别模型,提高对矿井遮蔽物后多目标的量化能力,探究UWB雷达最佳探测频段确定方法,为井下环境感知、生命信息探测与救援方案的制定提供帮助。

参考文献(References):

- [1] 程磊,孙洁.2016—2022年我国煤矿事故统计与规律分析[J].煤炭工程,2023,55(11):125-129.
CHENG Lei, SUN Jie. Statistics and law analysis of coal mine accidents in China from 2016 to 2022[J]. Coal Engineering, 2023, 55(11): 125-129.
- [2] 王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 297-322.
- [3] 刘峰,郭林峰,赵路正.双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J].煤炭学报,2022,47(1):1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [4] 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.
- [5] 郑学召,王虎,文虎,等.矿井钻孔救援通信技术的研究进展及趋势[J].工矿自动化,2017,43(9):41-45.
ZHENG Xuezha, WANG Hu, WEN Hu, et al. Research progress and tendency of mine drilling rescue communication technology[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(9): 41-45.
- [6] 郑学召,李诚康,文虎,等.矿井灾害救援生命信息探测技术及装备综述[J].煤矿安全,2017,48(12):116-119.
ZHENG Xuezha, LI Chengkang, WEN Hu, et al. Summary of mine disaster rescue life information detection technology and equipment[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(12): 116-119.
- [7] 田宏亮,邹祖杰,郝世俊,等.矿山灾害生命保障救援通道快速安全构建关键技术与装备[J].煤田地质与勘探,2022,50(11):1-13.
TIAN Hongliang, ZOU Zujie, HAO Shijun, et al. Key technologies and equipment of quickly and safely building life support and rescue channel in mine

- disaster[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(11): 1-13.
- [8] 郑学召, 孙梓峪, 张嫌妮, 等. 面向钻孔救援的超宽带雷达技术研究现状与方向[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(8): 20-26.
ZHENG Xuezha, SUN Ziyu, ZHANG Yanni, et al. Research status and direction of ultra-wide band radar technology for borehole rescue[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(8): 20-26.
- [9] 高广伟, 张禄华. 大直径钻孔救援的实践与思考——以山东平邑“12·25”石膏矿坍塌事故救援为例[J]. *中国应急管理*, 2016(3): 74-75.
GAO Guangwei, ZHANG Luhua. Practice and reflection on rescue of large diameter drilling: taking the rescue of the "12·25" gypsum mine collapse accident in Pingyi, Shandong as an example[J]. *China Emergency Management*, 2016(3): 74-75.
- [10] 马宏伟, 马琨, 田海波. 矿山钻孔救援探测机器人研究进展[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(2): 24-29.
MA Hongwei, MA Kun, TIAN Haibo. Research progress of mine drilling rescue detection robots[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(2): 24-29.
- [11] 路国华, 杨国胜, 王健琪, 等. 基于微功率超宽带雷达检测人体生命信号的研究[J]. *医疗卫生装备*, 2005(2): 15-16, 18.
LU Guohua, YANG Guosheng, WANG Jianqi, et al. The study on detection of the life signals of human subject based on micropower UWB radar[J]. *Chinese Medical Equipment Journal*, 2005(2): 15-16, 18.
- [12] 李欣欣. 遮蔽环境下基于超宽带雷达的生命探测技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
LI Xinxin. Research on life detection technology based on ultra-wideband radar in shading environment[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [13] YANG Degui, ZHU Zhengliang, ZHANG Junchao, et al. The overview of human localization and vital sign signal measurement using handheld IR-UWB through-wall radar[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 402-402.
- [14] HUANG Ling, WANG Zhao, TIAN Ming, et al. Influence of parameters on radar localization of human target under complex shielding environment[C]. iCatse International Conference on Information Science and Applications, Seoul, 2020: 3-9.
- [15] ZHANG Jingwen, QI Qingjie, CHENG Huifeng, et al. A multi-target localization and vital sign detection method using ultra-wide band radar[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2023, 23(13). DOI: 10.3390/S23135779.
- [16] XUE Huijun, LIU Miao, LYU Hao, et al. A dynamic clutter interference suppression method for multiple static human targets detection using ultra-wideband radar[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(12): 2854-2865.
- [17] YOON Y S, AMIN M G. Spatial filtering for wall-clutter mitigation in through-the-wall radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3192-3208.
- [18] SOLIMENE R, CUCCARO A. Front wall clutter rejection methods in TWI[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(6): 1158-1162.
- [19] LIN C H. Arteriovenous shunt stenosis assessment based on empirical mode decomposition and 1D-convolutional neural network: clinical trial stage[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2021, 66: 102461-102468.
- [20] 康守强, 胡明武, 王玉静, 等. 基于特征迁移学习的变工况下滚动轴承故障诊断方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(3): 764-772, 955.
KANG Shouqiang, HU Mingwu, WANG Yujing, et al. Fault diagnosis method of a rolling bearing under variable working conditions based on feature transfer learning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(3): 764-772, 955.
- [21] 王炜. 小波阈值消噪法在雷达信号检测中去噪效果的分析[J]. *山东工业技术*, 2020(4): 40-45.
WANG Wei. Analysis of denoising effect of wavelet threshold denoising method in radar signal detection[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2020(4): 40-45.
- [22] 张杨. 非接触生命探测系统中干扰抑制技术的研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2006.
ZHANG Yang. Research for controlling methods of interference on non-contact life parameter detecting system[D]. Xi'an: Fourth Military Medical University, 2006.
- [23] KHAN F, CHOI J W, CHO S H. Vital sign monitoring of a non-stationary human through IR-UWB radar[C]. The 4th IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, Beijing, 2014: 511-514.
- [24] LIANG Xiaolin, ZHANG Hao, YE Shengbo, et al. Improved denoising method for through-wall vital sign detection using UWB impulse radar[J]. *Digital Signal Processing*, 2017, 74: 72-93.
- [25] 陶启明. 基于超宽带雷达的生命特征信息提取技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
TAO Qiming. Vital sign monitoring using ultra wide band radar[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [26] MORGAN D R, ZIERDT M G. Novel signal processing techniques for Doppler radar cardiopulmonary sensing[J]. *Signal Processing*, 2008, 89(1): 45-66.
- [27] KHAN F, CHO S H. A detailed algorithm for vital sign monitoring of a stationary/non-stationary human through IR-UWB radar[J]. *Sensors*, 2017, 17(2): 290-290.
- [28] KAI S K, JIAU C L, LEI L P, et al. Detection of breathing and heart rates in UWB radar sensor data using FVPIEF-based two-layer EEMD[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(2): 774-784.
- [29] NIXON M S, CARTER J N, SHUTLER J D, et al. New advances in automatic gait recognition[J]. *Information*

- Security Technical Report**, 2002, 7(4): 23-35.
- [30] CHEN V C. Analysis of radar micro-Doppler with time-frequency transform[C]. The Tenth IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, Pocono Manor, 2000. DOI: 10.1109/SSAP.2000.870167.
- [31] ZHANG Zhu, ZHANG Xiao, LYU Hao, et al. Human-target detection and surrounding structure estimation under a simulated rubble via UWB radar[J]. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, 2013, 10(2): 328-331.
- [32] LI Zhao, LI Wenzhe, LYU Hao, et al. A novel method for respiration-like clutter cancellation in life detection by dual-frequency IR-UWB radar[J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 2013, 61(5): 2086-2092.
- [33] DORP P V, GROEN F C A. Human walking estimation with radar[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(5): 356-365.
- [34] DORP P V, GROEN F C A. Feature-based human motion parameter estimation with radar[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2008, 2(2): 135-145.
- [35] WANG Yazhou, LIU Quanhua, FATHY A E. CW and pulse-Doppler radar processing based on FPGA for human sensing applications[J]. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2012, 51(5): 3097-3107.
- [36] REN Lingyun, TRAN N, FOROUGHIAN F, et al. Short-time state-space method for micro-Doppler identification of walking subject using UWB impulse Doppler radar[J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 2018, 66(7): 3521-3534.
- [37] TANG M C, KUO Chaoyun, WUN D, et al. A self- and mutually injection-locked radar system for monitoring vital signs in real time with random body movement cancellation[J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 2016, 64(12): 4812-4822.
- [38] WANG Fukang, HORNG T S. Single self-injection-locked radar with two antennas for monitoring vital signs with large body movement cancellation[J]. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 2017, 65(12): 5324-5333.
- [39] 夏林林, 王健琪, 路国华, 等. 采用重现量化分析方法识别生物雷达回波信号中人体数量的研究[J]. 航天医学与医学工程, 2008(2): 126-129.
XIA Linlin, WANG Jianqi, LU Guohua, et al. Study on the method of recurrence quantification analysis(RQA) to recognize the amount of human bodies in bioradar echo signals[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2008(2): 126-129.
- [40] 张杨, 李岩峰, 焦腾, 等. 超宽谱雷达人体目标识别的新方法[J]. 信息化研究, 2010, 36(8): 22-24.
ZHANG Yang, LI Yanfeng, JIAO Teng, et al. A new method of human target recognition based on UWB radar[J]. Informatization Research, 2010, 36(8): 22-24.
- [41] 罗丁利, 王勇, 杨磊, 等. 基于微多普勒特征的单人与小分队分类技术[J]. 电讯技术, 2016, 56(9): 969-975.
LUO Dingli, WANG Yong, YANG Lei, et al. Technology for classifying an individual soldier and a small group based on micro-doppler features[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(9): 969-975.
- [42] 张自启, 吕昊, 陈扶明, 等. UWB 生物雷达多静止人体目标呼吸检测中“遮蔽效应”的实验研究[J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(4): 1-5.
ZHANG Ziqi, LYU Hao, CHEN Fuming, et al. Experimental study on shadowing effect of multi static human targets respiration detection with UWB bio-radar[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(4): 1-5.
- [43] 张杨, 吕昊, 于霄, 等. 基于超宽谱雷达多目标穿墙探测定位技术的研究[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(8): 10-13.
ZHANG Yang, LYU Hao, YU Xiao, et al. Research of through-wall detection and location technique for multihuman targets using ultra wideband radar[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2016, 37(8): 10-13.
- [44] 陈光, 费翔宇, 冯温雅, 等. 超宽带废墟搜救雷达的多生命体目标识别[J]. 现代电子技术, 2015, 38(19): 76-78.
CHEN Guang, FEI Xiangyu, FENG Wenya, et al. Multi-life group recognition based on UWB ruin-rescue radar[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(19): 76-78.
- [45] RIVERA N V, VENKATESH S, ANDERSON C, et al. Multi- target estimation of heart and respiration rates using ultra wideband sensors[C]. The 14th European Signal Processing Conference, Florence, 2006. DOI: 10.5281/ZENODO.40184.
- [46] 薛慧君, 刘淼, 邱富贵, 等. 遮蔽情况下多人体目标的探测和识别研究[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(10): 32-35.
XUE Huijun, LIU Miao, QI Fugui, et al. Detection and identification for multiple human targets under shadowing condition[J]. China Medical Devices, 2018, 33(10): 32-35.
- [47] REN Lingyun, SEO K Y, WANG Haofei, et al. Noncontact multiple heartbeats detection and subject localization using UWB impulse doppler radar[J]. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, 2015, 25(10): 690-692.
- [48] 胡志鹏. 超宽带 MIMO 雷达系统设计与穿墙成像方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
HU Zhipeng. Design of UWB MIMO radar system and research on the method of through-wall imaging[D]. Changchun: Jilin University, 2020.