



文章编号:1671-251X(2021)08-0020-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17800

面向钻孔救援的超宽带雷达技术研究现状与方向

郑学召^{1,2}, 孙梓峪^{1,2}, 张嫵妮^{1,2}, 张铎^{1,2}, 徐承宇^{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)



扫码移动阅读

摘要:针对目前基于视音频的钻孔生命信息识别技术在矿山救援过程中所面临的视频遇障失效和声波衰减速度快的问題,研究了能穿透煤岩体、砖墙等障碍物进行非接触式测量,实现生命信息识别的超宽带(UWB)雷达技术。从 UWB 电磁波的传输衰减特性、杂波的滤除与优化、目标生命识别方法 3 个方面分析了 UWB 雷达技术在矿山钻孔救援中应用的现状和存在的问题:① UWB 电磁波可对障碍物后人员生命信息进行识别与定位,其衰减与电场强度、磁场强度、频率和介质有关,但目前针对 UWB 电磁波传输衰减特性的研究缺乏对不同温度、探测频率、变质程度下各种煤岩体与 UWB 电磁波传输衰减之间的关系研究,对 UWB 电磁波的频率、入射角、极化形式等关键参数及变化特征与 UWB 电磁波衰减的关系研究较少。② 采用经验模态分解法、MUSIC 算法等方法可以对 UWB 电磁波中的杂波进行滤除,但缺乏对杂波滤除后有效波特征和信息的准确提取和科学表征,难以提高生命信息特征提取与识别的速度与精度。③ UWB 电磁波可以实现对障碍物后多目标人员生命体征如呼吸或心跳的捕捉,采用多雷达观测点可以提高低信噪比环境下生命信息探测的准确性,但目前的研究缺乏对呼吸、心跳、胸腔起伏、体温等多方位、多角度的系统识别与量化分析,缺乏对生命信息识别模型的优化方法。针对存在的问题,指出了 UWB 雷达技术在矿山钻孔救援应用中的研究方向:① 研究不同条件下各煤岩体自身性质和电磁波相关参数对 UWB 电磁波在煤岩体中传输衰减的影响,得出其传输衰减规律。② 研究适用于矿井环境下杂波的滤除优化与回波特征提取算法,利用回波中的有效特征建立学习样本数据库。③ 构建适用于矿井环境的人员生命信息识别模型,结合样本数据库对模型不断优化,以提高生命信息识别的精度和速度。

关键词:矿山钻孔救援; 钻孔垂直救援; 超宽带雷达; 生命信息识别; UWB 电磁波传输衰减; 杂波滤除; UWB

中图分类号:TD77

文献标志码:A

Research status and direction of ultra-wide band radar technology for borehole rescue

ZHENG Xuezhao^{1,2}, SUN Ziyu^{1,2}, ZHANG Yanni^{1,2}, ZHANG Duo^{1,2}, XU Chengyu^{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)

Abstract: In the mine rescue process, the current video and audio based borehole life information identification technology has the problems of video obstacle failure and fast speed of sound wave attenuation. In order to solve the above problems, the ultra-wide band (UWB) radar technology that can penetrate coal rock bodies, brick walls and other obstacles for non-contact measurement and realize life

收稿日期:2021-05-30;修回日期:2021-07-21;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金项目(52174197,51674191,51904234)。

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,孙梓峪,张嫵妮,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 Xuezhao, 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.

information identification is studied. The application status and existing problems of UWB radar technology in mine borehole rescue are analyzed from three aspects, including UWB electromagnetic wave transmission attenuation characteristics, clutter filtering and optimization, and the target life identification method. ① UWB electromagnetic waves can detect and locate the life information of people behind obstacles. Its attenuation is related to the electric field, magnetic field strength, frequency and medium. However, the current research on the attenuation characteristics of UWB electromagnetic wave transmission lacks the research on the law relationship between various coal and rock masses and UWB electromagnetic wave transmission attenuation at different temperatures, detection frequencies, and metamorphic degrees. There are few researches on the relationship between UWB electromagnetic wave frequency, incident angle, polarization form and other key parameters and change characteristics and UWB electromagnetic wave attenuation. ② The methods such as empirical mode decomposition method and MUSIC method can filter the clutter in UWB electromagnetic waves. But the methods lack accurate extraction and scientific representation of effective wave characteristics and information after clutter filtering, which makes it difficult to improve the speed and accuracy of life information characteristics extraction and identification. ③ UWB electromagnetic waves can capture the life signs of multiple target people behind obstacles, such as breathing or heartbeat. The use of multiple radar observation points can improve the accuracy of life information detection in a low signal-to-noise ratio environment. However, the current research lacks systematic identification and quantitative analysis of breathing, heartbeat, chest undulation, body temperature in multiple directions and from multiple angles. And the current research lacks an optimized method for life information identification models. In order to solve the existing problems, the research directions of UWB radar technology for borehole rescue application are pointed out as follows. ① It is proposed to study the influence of the properties of coal and rock masses and electromagnetic wave related parameters on the transmission attenuation of UWB electromagnetic wave in coal and rock masses under different conditions. The law of transmission attenuation is obtained. ② It is suggested to study on clutter filtering optimization and echo characteristic extraction algorithms suitable for mine environment, and use the effective characteristics in the echo to establish a learning sample database. ③ It is proposed to construct the personnel life information identification model applicable to the mine environment, and continuously optimize the model with the sample database to improve the accuracy and speed of life information identification.

Key words: mine borehole rescue; borehole vertical rescue; ultra-wide band radar; life information identification; UWB electromagnetic wave transmission attenuation; clutter filtering; UWB

0 引言

煤炭是我国目前发展的主体能源。近些年浅层煤炭资源被充分开采利用而逐渐枯竭,使矿井开采深度逐渐加深,多数矿井的平均开采深度已超过800 m^[1]。由于开采深度较深,巷道所处地质条件复杂,煤炭开采过程中面临的冲击地压与冒顶事故比例不断攀升^[2]。其中,冒顶事故易导致巷道堵塞,当疏通难度较大时,难以实现高效快速救援。钻孔救援技术通过在地面向井下打垂直钻孔,放入基于视音频的钻孔生命信息探测设备,进行井下人员生命信息辨识与定位,确认生命信息后实施大直径钻孔作业进行营救。与以往的救援方式相比,钻孔救援技术可以快速确定受困人员的位置并与之取得联

系,通过钻孔输送给养与医护物资,提高被困人员生还率,为后续救援赢得时间^[3]。

钻孔救援技术已有多次成功应用案例^[4]。2002年美国宾州某煤矿透水事故及2010年智利某铜矿坍塌事故均通过此技术实现了成功救援^[5]。2015年山东某石膏矿坍塌事故发生后,利用钻孔生命信息探测仪探测到4名被困人员并成功施救^[6]。2021年山东某金矿事故中,利用钻孔生命信息探测仪再次为钻孔施工提供救援可视化装备与技术支持,在井深585 m处“连线”到11名幸存矿工,为专家组制定技术方案提供了一手资料,为成功营救被困矿工作出了积极贡献^[7]。

虽有4次救援成功应用案例,但钻孔救援技术仍存在易受煤岩、地层性质影响的问题。在救援过

程中,如果所处环境地质偏软,会导致钻头偏移,造成新的局部塌方,导致生命信息探测设备出现测量偏差,甚至无法满足生命信息探测的要求^[8]。主要原因是目前常用的矿井钻孔通信装置与生命探测系统大多基于视频和音频技术,面临塌方阻隔时无法实现穿透探测^[9],井下被困人员的生命信息获取困难。超宽带(Ultra-wide Band, UWB)电磁波拥有很强的穿透性,可以穿透煤岩体、混凝土等非磁性物质,对障碍物之后的目标进行非接触式测量,解决了基于光学原理的视频探测技术面临的遇障失效以及基于声学原理的音频探测技术面临的声波在介质中传播衰减速度快的难题^[10],可以很好地满足生命探测与定位的要求。UWB 雷达在地震建筑物塌方与废墟下的人员搜救及路面、桥梁、隧道探伤方面应用较多^[11],但在矿山救援方面应用还较少,究其原因主要是 UWB 电磁波在煤岩体中的传输衰减规律未知,适用于矿井环境的杂波滤除与优化方法和生命信息识别模型研究不足。

本文从 UWB 电磁波传输衰减特性、杂波的滤除与优化、目标生命识别方法 3 个方面分析了 UWB 雷达技术在矿山钻孔救援中应用的研究现状和存在的问题,并提出解决问题的研究方向与方法。

1 研究现状

1.1 UWB 电磁波传输衰减特性

在 UWB 电磁波传输衰减方面,唐彤彤等^[12]以电磁波入射角与地层倾斜角为研究对象,得出电磁波在不规则地层中从一个介质进入另一个介质时会受到电场和磁场的影响,并发生一定程度的突变衰减。陈清礼等^[13]研究了所有波谱范围内电磁波的衰减程度与电磁波频率间的关系,得出电磁波衰减程度与频率的增长呈正比关系,当频率到达某个阈值时,衰减程度会急剧下降,最后趋于零,这是由于位移电流占主导,传导电流趋于零所导致。王弘刚等^[14]研究发现电磁波的频率在 2~8 GHz 时,其穿透厚度为 12 cm 的实心砖墙之后信号强度减小值在 20 dB 左右,并得出了电磁波的衰减与砖体、水泥的介电常数等因素有关。Xu Hang 等^[15]利用 UWB 电磁波穿透砖墙与木门,对其后方的人员生命信息进行探测,获得了人员的呼吸频率和距离信息。孙公德等^[16]使用分布式 UWB 雷达探测地震废墟下被掩埋人员的位置信息,效果显著,其原理如图 1 所示。

叶伟^[17]对基于 UWB 雷达技术的井下巷道人员定位系统进行了研究,发现在井下封闭环境中 UWB 电磁波在巷道视距范围内(井底直巷)的定位

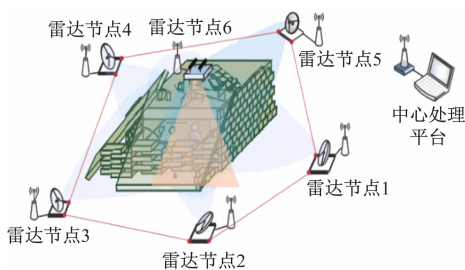


图 1 分布式雷达协同探测原理

Fig. 1 Principle of distributed radar collaborative detection 效果较好,但是对于视距之外(巷道方向改变,存在转向)的部分定位效果较差,这是因为对于视距之外的部分,UWB 电磁波会穿透介质复杂的煤岩壁,造成信号衰减,使得目标定位的准确度下降。Y. Rissafi 等^[18]研究了在 3~10 GHz 频率范围内的地下矿井环境中 UWB 传输损耗特性,证明地下环境中 UWB 的损耗指数大于室内环境的损耗指数。陈承申等^[19]推导出了探地雷达波动方程,并利用探地雷达数值模拟进行验证,这对于研究电磁波在地下介质环境中的传输衰减规律有很好的指导意义。

综上所述,UWB 电磁波的衰减与电场强度、磁场强度、频率和介质有关,UWB 电磁波可穿透煤岩体、砖墙等障碍物,对障碍物后人员生命信息进行探测与定位,为矿山钻孔救援提供重要技术保障。但目前对于 UWB 电磁波传输衰减特性的研究缺乏对不同温度、探测频率、变质程度下各种煤岩体与 UWB 电磁波传输衰减之间的关系研究,对 UWB 电磁波的频率、入射角、极化形式等关键参数及变化特征与 UWB 电磁波衰减的关系研究较少。

1.2 UWB 电磁波中杂波的滤除与优化

由于井下救援环境复杂,雷达所探测到的生命信息回波信号会被杂波掩盖,精准提取难度较大。针对该问题,张金元等^[20]采用小波变换和经验模态分解联合去噪法,使得 UWB 雷达技术在传播探测过程中的杂波得到了较好抑制,信噪比得到了提升。郭继坤等^[21]采用经验模态分解法将矿井环境下的 UWB 信号中的杂波与有效波进行分离,获取了人体的呼吸、心跳信号。钟雷等^[22]使用弱目标检测法滤除存在于电磁波回波中的大量杂波,降低了测量误差。文乐等^[23]针对生命探测雷达中人体呼吸的回波信号所存在的固定杂波,提出用 MUSIC 算法抑制噪声,提高信噪比,在模拟实验中对混凝土墙(厚度为 20 cm)后 1.5 m 处人员的呼吸信号的杂波抑制效果显著。F. H. C Tivive 等^[24]针对雷达成像提出了一种有效的墙壁杂波抑制方法,并且利用模拟和实际数据的实验结果证明了该方法对抑制墙壁

杂波的有效性。

以上研究表明,采用经验模态分解法、MUSIC算法等方法可以对 UWB 电磁波中的杂波进行滤除,从中获取人体的呼吸、心跳信号,实现生命信息探测,为矿山钻孔救援过程中的 UWB 电磁波的回波分析提供方法指导。但现有杂波滤除方法比较单一,缺乏对杂波滤除后有效波特征和信息的准确提取和科学表征,难以提高生命信息特征提取与识别的速度与精度。

1.3 基于 UWB 电磁波的目标生命识别方法

作为一种非接触式生命信息识别方法,UWB 雷达生命信息识别方法为生命信息识别提供了新思路。井下被困人员的呼吸、心跳等生命体征被 UWB 电磁波捕获后所产生的回波可以作为生命信息识别的重要依据,其原理如图 2 所示。

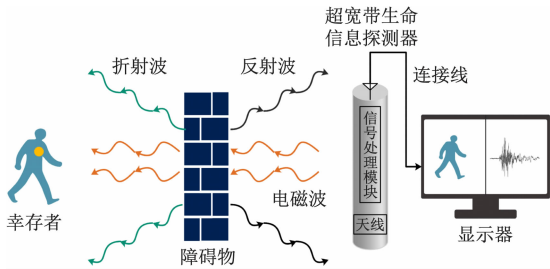


图 2 UWB 电磁波探测到的障碍物后的人员信号

Fig. 2 Personnel signal behind obstacles detected by UWB electromagnetic wave

在目标生命识别方面,张杨等^[25]提出了一种应用超宽谱探人雷达的人体识别新方法,该方法基于波形匹配的思想,采用信号幅值和离散系数相结合的方式,对探测区域内有无人体目标的情况进行判别。在实验中利用 UWB 电磁波穿透砖墙(厚度为 30 cm)进行人体目标探测,准确度达 88.9%。窦兴川等^[26]利用不同波段的电磁波穿透非金属障碍物后探测人体特征,研究人体心跳、呼吸、运动信号的采集和无线传输,可以明显探测到位于砖墙(厚度为 30 cm)后方 12~35 m 处的人体运动特征。陈光等^[27]提出了一种基于 UWB 电磁波的多生命体目标识别法,解决了目前搜救雷达探测过程中探测生命数量较少的问题。蒋留兵等^[28]利用集合经验模态分解法对 UWB 电磁波回波进行分解,提高了可探测目标的数目与识别率,在实验中,对墙体(厚度为 25 cm)后 1.5 m 处 3 个人体目标的识别率高达 86.7%。姚思奇等^[29]提出了一种基于超宽带生命探测雷达的多观测点呼吸信号检测及目标定位方法,该方法以单观测点目标检测算法预处理后的检测结果为基础,通过引入互相关和快速傅里叶变换运算,提高了低信噪比条件下距离检测的准确性,能有效获取低信噪比条件下生命体距离和位置信

息,缩小了救援范围,为生命救援提供了保障。Liu Lanbo 等^[30]利用时域有限差分法和综合计算实验研究了 UWB 雷达技术在地震后建筑物下人体生命体征检测中的应用,UWB 雷达技术可对不同体征、不同位置的人体信息进行识别,效果良好。Liang Xiaolin 等^[31]开发了一种基于改进 UWB 雷达技术的生命检测算法,可以从收集的电磁波中提取人员的心跳、呼吸等生命信息。

以上研究表明,UWB 电磁波可以实现对障碍物后多目标人员生命体征如呼吸或心跳的捕捉,实现目标生命信息识别。采用多雷达观测点可以提高低信噪比环境下生命信息识别的准确性,为 UWB 电磁波在矿山钻孔救援中的生命信息识别提供保障。但目前的研究对生命信息体征的辨识目标较为单一,缺乏对呼吸、心跳、胸腔起伏、体温等多方位、多角度的系统识别与量化分析,缺乏对生命信息识别模型的优化方法,未能在矿井复杂环境中进行现场实验验证。因此,仍需针对矿井复杂环境提出一种具有普适性的生命信息识别量化方法。

2 研究方向

针对目前 UWB 电磁波在矿井煤岩体中的传输衰减规律不明确、杂波的滤除与优化方法单一且回波中有效波的提取与表征研究较少、生命信息识别方法的生命信息体征识别种类单一的问题,可以从以下 3 个方面入手开展相关实验研究。

2.1 井下 UWB 电磁波传输衰减实验研究

开展 UWB 雷达生命信息探测装置的煤岩穿透实验,研究 UWB 电磁波穿透煤岩体及探测到生命目标后返回全过程中的传输衰减规律。UWB 雷达生命信息探测系统如图 3 所示。



图 3 UWB 雷达生命信息探测系统

Fig. 3 UWB radar life information detection system

(1) 为掌握 UWB 电磁波衰减的影响因素,将矿物质、灰分和水分等因素纳入考虑范围,研究这些因素对煤体中 UWB 电磁波传输衰减的影响规律,对所有影响因素进行重要性排序。

(2) 为还原现场煤岩体环境,需设计以单一煤体、煤岩体与混合煤岩体作为穿透介质在不同温度、

不同探测频率等条件下的 UWB 电磁波传输衰减实验方案。在此基础上,需研究煤电性参数(相对介电常数、介电损耗等)在单一煤体、煤岩体与混合煤岩体中的变化规律,分析这些物理参数与 UWB 电磁波传输衰减之间的关系,从而得出 UWB 电磁波的传输衰减规律。

(3) 以 UWB 电磁波在不同种类煤岩介质、探测厚度、测试频率等多因素条件下的电磁波相关参数(反射系数、折射系数、频谱能量、振幅、信噪比、相位等)的变化特征作为研究 UWB 电磁波在煤岩体中的穿透特性的指标参数,建立指标参数与影响因素之间的映射关系,确定 UWB 电磁波关键参数对环境特征的敏感程度,为研究电磁波的传输衰减特性奠定基础。电磁波传输衰减测试原理如图 4 所示。

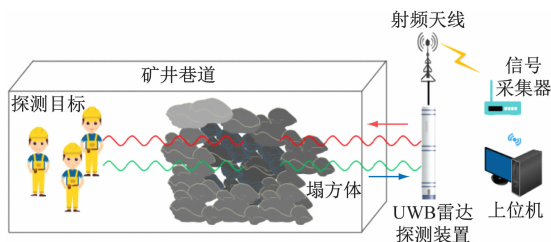


图 4 电磁波传输衰减测试原理

Fig. 4 Principle of electromagnetic wave transmission attenuation test

从以上 3 个方面建立 UWB 电磁波在煤岩体中传播的理论模型,为 UWB 雷达技术在矿山钻孔救援中的应用和研究提供理论和数据支撑。

2.2 杂波的滤除与有效波特征的提取研究

分析多种杂波滤除方法对矿井环境下电磁波杂波的适用程度,研究适用于井下复杂环境的杂波滤除与回波特征提取方法。

采用基于 K-L(霍特林)变换的 Fast ICA(快速独立成分分析法)对杂波特征进行同步滤除,该方法能很好地从 UWB 电磁波回波信号中提取被未知因素混合的信号。

通过半正定松弛、拉格朗日对偶法对 UWB 电磁波杂波特征参数如波形、振幅等进行放大,使其有效区别于回波中的有效波,以便于辨识和剔除。

利用现场与实验室实测的电磁波与杂波数据,检验并优化以上杂波抑制滤除方法,对回波的有效特征如波形、相位等进行提取,建立学习样本数据库,为井下人员生命信息识别模型提供样本数据。

2.3 矿井生命信息识别模型构建

应用深度学习理论研究随机共振算法的改进方法,将人员生命信息表征参数如呼吸、心跳、胸腔起伏、体温等生命体征作为生命信息识别的主要依

据,建立基于随机共振算法的生命信息识别模型。

利用有效波特征建立的学习样本数据库不断对模型进行训练优化,量化识别目标的位置、数量,提高量化识别的精度;借助现场试验,验证实际复杂环境下量化识别方法的可靠性和普适性,逐步提高模型的识别速度和精度,为矿山钻孔救援过程中的生命信息探测以及救援人员指挥决策提供依据和帮助,以实现灾害环境下钻孔救援生命信息的准确识别。

3 结论

(1) UWB 雷达技术具有很强的穿透性,可以穿透煤岩体等物质,对障碍物之后的目标进行非接触式测量。从 UWB 电磁波的传输衰减特性、杂波的滤除与优化、目标生命识别方法 3 个方面分析了 UWB 雷达技术在矿山钻孔救援中应用的现状和存在的问题:① UWB 电磁波可穿透煤岩体、砖墙等障碍物对障碍物后人员生命信息进行识别与定位,其衰减与电场强度、磁场强度、频率和介质有关,但目前对 UWB 电磁波传输衰减特性的研究缺乏对不同温度、探测频率、变质程度下各种煤岩体与 UWB 电磁波传输衰减之间的关系研究,对 UWB 电磁波的频率、入射角、极化形式等关键参数及变化特征与 UWB 电磁波衰减的关系研究较少。② 采用经验模态分解法、MUSIC 算法等方法可以对 UWB 电磁波中的杂波进行滤除,从中获取人体的呼吸、心跳信号,实现生命信息识别,但现有杂波滤除方法比较单一,缺乏对杂波滤除后有效波特征与信息的准确提取和科学表征,难以提高生命信息特征提取与识别的速度与精度。③ UWB 电磁波可以实现对障碍物后多目标人员生命体征如呼吸或心跳的捕捉,实现人员生命信息探测,但目前的研究对生命信息体征的辨识目标较为单一,缺乏对呼吸、心跳、胸腔起伏、体温等多方位、多角度的系统识别与量化分析,缺乏对生命信息识别模型的优化方法。

(2) 为了适应矿山钻孔救援的需要,今后可从以下 3 个方面展开实验研究:开展 UWB 雷达生命信息探测装置的煤岩体穿透实验,研究影响电磁波传输衰减的因素与条件;研究适用于井下环境的杂波滤除与有效波中的生命信息特征提取算法,并建立样本数据库;建立适用于矿井环境的生命信息识别模型,结合样本数据库,通过不断的模型训练与算法优化及现场试验的验证对比,提高生命信息的识别精度与速度。这些研究方法可为 UWB 雷达技术在矿山钻孔救援中的应用提供理论支撑和技术保障。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5):1557-1566.
YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5):1557-1566.
- [2] 高莹,侯凌燕,刘秀磊. 煤矿典型动力灾害知识库建设现状及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 209-216.
GAO Ying, HOU Lingyan, LIU Xiulei. Development trend and status of database construction of typical dynamic disasters in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1):209-216.
- [3] 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.
- [4] 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 Xuezhao, 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.
- [5] 黄军利. 国外煤矿应急救援技术装备综述[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9):233-236.
HUANG Junli. A review of foreign technical equipment on coal mine emergency rescue[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(9):233-236.
- [6] 李亮. 平邑石膏矿坍塌事故救援成功后的几点思考[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 281-286.
LI Liang. Discussion of Pingyi Gypsum Mine collapse accident rescue[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10):281-286.
- [7] 王久平. “地心营救”既有收获也见不足——写在山东笏山矿难 11 名矿工获救之后[J]. 中国应急管理, 2021(2):10-13.
WANG Jiuping. "Geocentric rescue" has both gains and shortcomings - written after 11 miners were rescued in the Hushan Mine disaster in Shandong Province [J]. China Emergency Management, 2021(2):10-13.
- [8] 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.
- [9] 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 Xuezhao, 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.
- [10] 张铎. 超宽带雷达波在煤中传播规律与定位基础研究[D]. 西安:西安科技大学, 2018.
ZHANG Duo. Fundamental research on propagation law of ultra-wideband radar wave in coal and localization[D]. Xi'an, Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [11] 邵金进,纪英才,方广有,等. 用于公路检测的超宽带横向电磁波喇叭天线[J]. 电波科学学报, 2014, 29(4):723-728.
SHAO Jinjin, JI Yicai, FANG Guangyou, et al. Ultra-wideband TEM horn antenna for road investigation [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(4):723-728.
- [12] 唐彤彤,杨维,邵小桃. 不规则分层地层中电磁波透射传输的衰减特性[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1912-1918.
TANG Tongtong, YANG Wei, SHAO Xiaotao. Transmission attenuation characteristics of electromagnetic wave through irregular layered strata [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7):1912-1918.
- [13] 陈清礼,肖希,蒋晓斌,等. 电磁波衰减系数特性分析[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(8):43-45.
CHEN Qingli, XIAO Xi, JIANG Xiaobin, et al. The attenuation characteristics of electromagnetic wave [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(8):43-45.
- [14] 王弘刚,张存波,张建德. 实心砖墙对电磁波的衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(9):2373-2377.
WANG Honggang, ZHANG Cunbo, ZHANG Jiande. Attenuation characteristics of solid brick walls to electromagnetic waves [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(9):2373-2377.
- [15] XU Hang, LI Ying, ZHANG Jianguo, et al. Ultra-wideband chaos life-detection radar with sinusoidal wave modulation [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2017, 27(13):1730046.
- [16] 孙公德,郭勇,沈建,等. 分布式超宽带雷达地震被困人员协同探测技术[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(4): 966-977.
SUN Gongde, GUO Yong, SHEN Jian, et al.

- Collaborative detection technology of earthquake trapped people by distributed UWB radar [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, 12(4): 966-977.
- [17] 叶伟. 煤矿井下目标定位的研究现状与展望[J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 82-89.
- YE Wei. Status and prospects of research on positioning of targets in underground coal mines [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(1): 82-89.
- [18] RISSAFI Y, TALBI L, GHADDAR M. Experimental characterization of an UWB propagation channel in underground mines [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012, 60(1): 240-246.
- [19] 陈承申, 冯德山. 探地雷达有限元数值模拟及衰减特性探讨[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(2): 152-157.
- CHEN Chengshen, FENG Deshan. Discussion on finite element numerical simulation and attenuation characteristics of ground penetrating radar [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(2): 152-157.
- [20] 张金元, 张晶, 付庆霞. 超宽带雷达树丛穿透干扰抑制算法[J]. 电子技术与软件工程, 2017(6): 89.
- ZHANG Jinyuan, ZHANG Jing, FU Qingxia. Interference suppression algorithm for UWB radar tree penetration [J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2017(6): 89.
- [21] 郭继坤, 王保生, 郝维来, 等. 基于超宽带信号的矿井塌方体下生命特征的检测方法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(1): 73-76.
- GUO Jikun, WANG Baosheng, HAO Weilai, et al. Research on detection method of life under mine based on ultra-wideband signal[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2017, 27(1): 73-76.
- [22] 钟雷, 李勇, 牟之英, 等. 未知强杂波下基于 DP-TBD 的雷达弱目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(1): 43-49.
- ZHONG Lei, LI Yong, MOU Zhiying, et al. Detection method for weak target under unknown strong clutter based on DP-TBD [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(1): 43-49.
- [23] 文乐, 方晖, 张兴敢. 基于 MUSIC 算法的生命探测雷达信号处理方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2016, 52(5): 946-952.
- WEN Le, FANG Hui, ZHANG Xinggan. Signal processing for life detection radar based on MUSIC algorithm[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2016, 52(5): 946-952.
- [24] TIVIVE F H C, BOUZERDOUM A, AMIN M G. A subspace projection approach for wall clutter mitigation in through-the-wall radar imaging [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(4): 2108-2122.
- [25] 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 for human target recognition by ultra-wide spectrum radar [J]. Informatization Research, 2010, 36(8): 22-24.
- [26] 窦兴川, 梁凯. 多频穿透式人体探测实验雷达设计与实现[J]. 现代雷达, 2012, 34(9): 18-22.
- DOU Xingchuan, LIANG Kai. Design and realization of experiment radar using multi-frequency penetration for human body detection [J]. Modern Radar, 2012, 34(9): 18-22.
- [27] 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.
- [28] 蒋留兵, 韦洪浪, 许腾飞, 等. EEMD 生命探测雷达人体数量识别技术[J]. 电子技术应用, 2014, 40(5): 122-125.
- JIANG Liubing, WEI Honglang, XU Tengfei, et al. Technology of recognizing the number of the people based on EEMD life detection radar [J]. Application of Electronic Technique, 2014, 40(5): 122-125.
- [29] 姚思奇, 吴世有, 张经纬, 等. 一种基于超宽带雷达的多观测点人体呼吸信号检测方法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 188-195.
- YAO Siqi, WU Shiyong, ZHANG Jingwei, et al. Method for human respiration signal detection based on ultra-wideband radar [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(10): 188-195.
- [30] LIU Lanbo, LIU Zijian, XIE Hao, et al. Numerical simulation of UWB impulse radar vital sign detection at an earthquake disaster site [J]. Ad Hoc Networks, 2014, 13(2): 34-41.
- [31] LIANG Xiaolin, ZHANG Hao, LYU Tingting, et al. Ultra-wide band impulse radar for life detection using wavelet packet decomposition [J]. Physical Communication, 2018, 29(8): 31-47.