

煤与煤系气地质与勘查

矿井煤岩界面节点式雷达快速动态探测系统及实验研究

许献磊¹, 陈令洲², 彭苏萍², 梁鹏², 赵禹深²

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要:煤岩界面识别技术是煤矿智能化开采的关键技术之一。基于高频雷达波探测技术可实现煤岩界面的随采高精度探测, 但仍存在矿井超大采高(≥ 6 m)片帮垮落带来设备的安全风险及采高突变(采高 ≤ 2 m)时空间限制设备通过的问题。在前期工作基础上提出了一种矿井煤岩界面节点式雷达快速动态探测系统并进行了煤岩界面探测实验研究, 主要内容包括:①阐述矿井节点式雷达观测系统原理, 根据矿井工作面实际环境设计煤岩界面识别观测系统方案及雷达传感单元安装方式;②研究并提出节点式采集控制系统和信息交互传输设计方案, 实现数据动态采集控制及存储;③针对节点式采集方式及煤岩界面雷达反射回波特征, 研究提出了节点探测数据增强处理方法、煤岩界面识别算法, 可有效的实现煤岩界面智能识别与追踪、煤层厚度及空间坐标解算。为验证该方法的可行性, 采用多个中心频率为1.5 GHz的探地雷达传感单元进行物理模型验证实验, 并对节点式数据采集和连续数据采集结果进行了对比分析, 实验结果表明:节点式采集方法与连续采集方法均可有效识别出煤岩界面, 与连续采集方法相比, 本文提出的节点式探测方法可实现数据的快速动态重复性采集, 单次采集时长控制在10 s以内, 煤层厚度探测结果平均误差为1.07 cm, 最大误差为1.47 cm, 平均误差百分比为7.64%。本方法为矿井智能化开采中煤岩界面的动态高精度探测提供技术支撑。

关键词:煤岩识别;探地雷达;节点式雷达观测系统;误差分析

中图分类号:P631; TD67 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2024)04-1964-12

Mining coal-rock interface nodal GPR rapid dynamic detection system and experimental research

XU Xianlei¹, CHEN Lingzhou², PENG Suping², LIANG Peng², ZHAO Yushen²

(1. Key Laboratory of Fine Coal Exploration and Intelligent Development, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. College of Earth Science and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Coal-rock interface recognition technology is one of the key technologies for intelligent mining in coal mines. Based on high-frequency radar wave detection technology, high-precision detection of coal-rock interfaces can be achieved with mining, but there are still safety risks for equipment caused by rib spalling and roof caving in ultra-high mining heights (≥ 6 m) in mines, as well as spatial restrictions on equipment passing through during sudden changes in mining height (mining height ≤ 2 m). Based on previous work, this paper proposes a rapid dynamic detection system and method for coal-rock interfaces in mines using nodal GPR. The main contents include: ① Explaining the principle of the

收稿日期:2024-02-19 修回日期:2024-04-01 责任编辑:韩晋平 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.XH24.0166

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFC3008902, 2023YFB3211002); 国家自然科学基金资助项目(52174155)

作者简介:许献磊(1982—),男,河南南阳人,教授,博士。Tel:010-62339358, E-mail:xuxl@cumtb.edu.cn

引用格式:许献磊,陈令洲,彭苏萍,等.矿井煤岩界面节点式雷达快速动态探测系统及实验研究[J].煤炭学报,2024,49(4):1964-1975.

XU Xianlei, CHEN Lingzhou, PENG Suping, et al. Mining coal-rock interface nodal GPR rapid dynamic detection system and experimental research[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1964-1975.



移动阅读

nodal GPR observation system in mines, designing a coal-rock interface recognition observation system plan and radar antenna sensor installation method based on the actual environment of the mine working face; ② Studying and proposing a nodal acquisition control system and information interaction transmission design plan to achieve dynamic data acquisition, control, and storage; ③ Studying and proposing enhanced processing methods for sensor detection data and coal-rock interface recognition algorithms based on nodal acquisition methods and radar reflection echo characteristics of coal-rock interfaces, which can effectively achieve intelligent recognition and tracking of coal-rock interfaces, as well as calculation of coal seam thickness and spatial coordinates. To verify the feasibility of this method, multiple geological radar antenna sensors with a center frequency of 1.5 GHz were used for physical model verification experiments, and a comparative analysis of nodal data acquisition and continuous data acquisition results was conducted. The experimental results show that both nodal and continuous acquisition methods can effectively identify coal-rock interfaces. Compared with continuous acquisition methods, the nodal detection method proposed in this paper can achieve rapid and dynamic repetitive data acquisition, with a single acquisition time controlled within 10 seconds, an average error of 1.07 cm for coal seam thickness detection results, a maximum error of 1.47 cm, and an average error percentage of 7.64%. This method provides technical support for dynamic high-precision detection of coal-rock interfaces in intelligent mining in mines.

Key words: coal and rock identification; geological radar; nodal GPR observation system; error analysis

当前矿井煤矿迫切需求智能采煤,建立一个集感知、分析、决策和控制为一体的智能采煤系统,实现高效、安全煤炭生产的目标^[1-3]。煤岩界面识别关系到采煤机的精确切割,是矿井煤矿智能化、无人化生产的关键技术,也是煤矿地质保障系统的关键环节^[4],同时煤岩界面识别技术也是支撑煤机智能设备发展的关键技术^[5]。矿井中采煤机位置的调整主要依靠人员现场观测煤岩界面或传送带中煤-岩比例,然而人工调整精度有限,效率低下,并且存在生产安全隐患。准确获取煤岩界面信息,指导采煤机对煤层的精准截割,一方面可避免切入岩石导致齿轮磨损、在高瓦斯地区因产生火花引起爆炸等问题,同时还可有效提高煤炭采出率,近零损害的绿色开采,降低煤矸石含量,最大程度地减少煤炭生产对生态环境的损害,使煤炭资源得到高效充分利用^[6]。

国内外多位行业研究人员对煤岩识别技术开展攻关研究,提出了多种煤岩识别方法,采煤技术装备向高端智能装备方向发展^[7]。田勇等^[8-9]监测采煤机截割不同截割介质时滚筒销轴所受的截割力,发现截割岩比截割煤所受应力大19%。TIAN等^[10]提出一种基于GAF-深度学习的煤岩识别方法,将切割不同比例的煤岩产生的振动信号转换为二维图像,利用ResNet网络进行煤岩比分类识别。张强等^[11-12]采用主动热激励激发煤岩界面红外热像,对煤岩的红外图像进行了分割和去噪,用以识别煤岩界面,实验结果显示煤岩红外图像识别结果与实际测试样本一致,最大误差为0.56%。王欣等^[13]通过利用采煤机切割位置煤-岩成分在太赫兹时域光谱响应上的区别,来估计采煤机滚筒齿嵌入岩层的深度。YU Jing等^[14]研究了煤岩

不同成分在太赫兹波段的不同响应,并通过主成分分析、SVM和太赫兹光谱数据对煤岩进行分类识别,取得了较高的识别率。杨恩、王世博等^[15-16]在实验室环境利用高光谱识别技术在350~2 500 nm波段进行了反射光谱的采集对煤岩试样进行光谱特征分析,以吸收谱带差异为基础进行煤岩识别,总体识别精度达到90%左右。杨文萃等^[17]采用声学探测法推导出声波水煤、煤岩2个界面传播、反射的回波公式,构成路径传输煤岩识别声学模型,验证了模型的可行性。李彦明和孙利海^[18]采用深度学习模型实现了基于煤岩图像特征和基于钻进参数2种异构信息的耦合反馈的识别方法,煤岩识别精度达到90%左右。上述方法在特定条件下可实现煤岩识别并得到实际验证,但是在工程应用中仍然存在一些问题:①通过分析截割应力实现煤岩界面识别,只有在高截割力下才明显,无法提前预判到煤岩界面位置;②机器学习方法需要大量样本,且不具备普适性和实时性;③通过反射光谱分析煤岩成分来判别煤岩界面,对煤的种类以及环境湿度表面结构要求较高,不具备普适性;④声波法在采煤机工程过程中会受到大量扰动,识别率低^[19]。

基于电磁勘探方法的探地雷达对煤岩界面探测具有较高的精度,彭苏萍院士团队^[20-21]提出了适用于智能综采工作面煤岩界面的非接触智能探测理论与技术框架,并且开发空气耦合屏蔽雷达,设计了智能自适应调节支架系统,分析了空气耦合雷达对煤岩界面识别的精度和误差,提出了多干扰源下的煤岩界面识别与追踪方法,实现了矿井煤岩界面随采动态探测。在实际应用中,该方法也存在2个问题:①在矿井超大采高(≥ 6 m)条件下,片帮、漏顶会导致设备的损坏,

安全风险较高;②中、大采高矿井的煤岩界面探测仪器支架的高度更大,遇到采高突变(采高 $\leq 2\text{ m}$)时,空间限制设备通过,存在碰撞等安全风险。

在前期工作基础上,笔者提出了基于矿井节点式雷达观测系统的煤岩界面动态识别方法(以下简称节点式探测方法)。随采动态探测方法将探地雷达安装于采煤机,跟随采煤机连续采集雷达数据形成剖面,通过种子点选取获取煤岩界面曲线。优点是数据丰富、连续性好,刻画精细,但受震动影响信噪比低,容易被片帮、漏顶破坏探测设备,以及在中、大采高矿井可能存在空间限制装备通过的情况,存在碰撞安全风险。本文所提出的节点式探测方法在综采工作面液压支架上布设多个雷达传感单元,进行探测工作时,机械臂控制雷达传感单元靠近煤顶板,采集单道雷达波数据,通过振幅特征曲线分析单道雷达波数据,获取煤岩界面信息,具有高安全性和低干扰以及稳定采集的优点,但数据量和连续性有限,限制常规层位追踪方法的应用。

本文主要研究内容包括矿井节点式雷达观测系统原理及架构、雷达传感单元及安装方式、采集数据快速处理与煤岩界面识别算法、煤岩模型实验及误差分析等。

1 矿井煤岩界面节点式雷达探测系统原理及架构

1.1 矿井煤岩界面节点式雷达探测原理

矿井节点式雷达观测系统是在采煤工作面切割方向上,每隔一定的间距($5\sim 10\text{ m}$)布设1个探地雷达传感单元,雷达传感单元均匀分布在整个工作面切割方向上,通过采集控制系统同步获取每个雷达传感单元所在位置信息及的煤岩界面探测数据,节点式采集系统示意如图1(a)所示。节点式雷达探测系统包含节点式采集观测系统、数据交互处理中继模组以及集控终端3个部分。与图1(b)所示随采动态探测方法相比,本方法数据采集过程更加安全,避免了设备移动中振动的干扰,提高数据的信噪比,并且可以快速的实现工作面切割长度方向的全覆盖探测。

1.2 节点式雷达动态探测技术架构

节点式雷达快速动态探测系统技术架构如图2所示,探测过程中,集控终端向节点式雷达观测系统发出指令,雷达单元采集煤岩界面数据,雷达数据经数据交互处理模组传回集控终端;雷达数据经过叠加、背景去噪、增益等数据处理后,利用单道雷达数据计算振幅特征曲线突出煤表面和煤岩界面的反射波振幅特征并同步拾取反射波所在位置的样点数,再通过

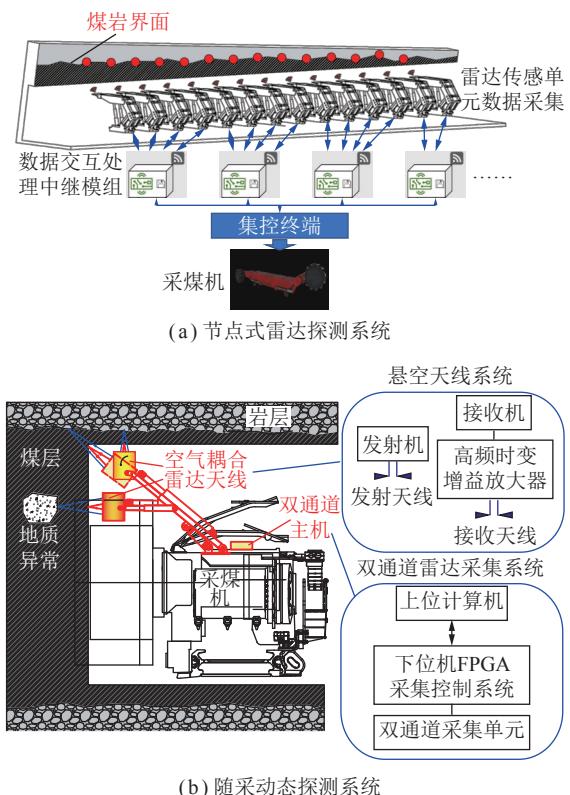


图1 节点式雷达探测系统与随采动态探测系统
Fig.1 Nodal GPR detection system and accompanying dynamic detection system

样点数计算各采集点位煤层厚度,从而得到节点式观测系统范围内的煤岩界面位置信息,建立动态反馈机制,最终将煤岩界面煤层厚度和坐标信息传输给透明化地质保障平台或采煤机,用于智能调节滚筒截割高度。

1.3 节点式雷达传感单元

节点式雷达观测系统由多个以一定间距布设的雷达传感单元组成,雷达传感单元功能为直接辐射和接收电磁波信号,直接关系着整个系统的采集数据质量与煤岩界面识别精度。笔者选用的雷达传感单元是采用的是中心频率为1500 MHz的喇叭天线,天线采用加载屏蔽装置的设计,可有效加强天线方向性以及屏蔽外界干扰因素,天线方向如图3(b)所示,主瓣强度11.5 dBi,主瓣宽度72.3°。有效探测距离为0~1 m。雷达传感单位如图3(a)所示。

如图4所示,雷达安装于液压支架顶梁下方,由节点式控制系统控制的机械臂连接雷达和液压支架顶梁相连接,液压支架移动时,机械臂收到系统指令进行将雷达置于顶梁下方,进行煤岩界面探测时机械臂推出雷达单元,将雷达单元置于煤顶板下方,再由控制系统指令雷达进行煤岩界面探测工作,采煤机的截割宽度为80 cm,所以在截割面80 cm范围内没有其他干扰物,且雷达传感单元中天线为屏蔽天线设计,可以最大程度上屏蔽外界干扰。

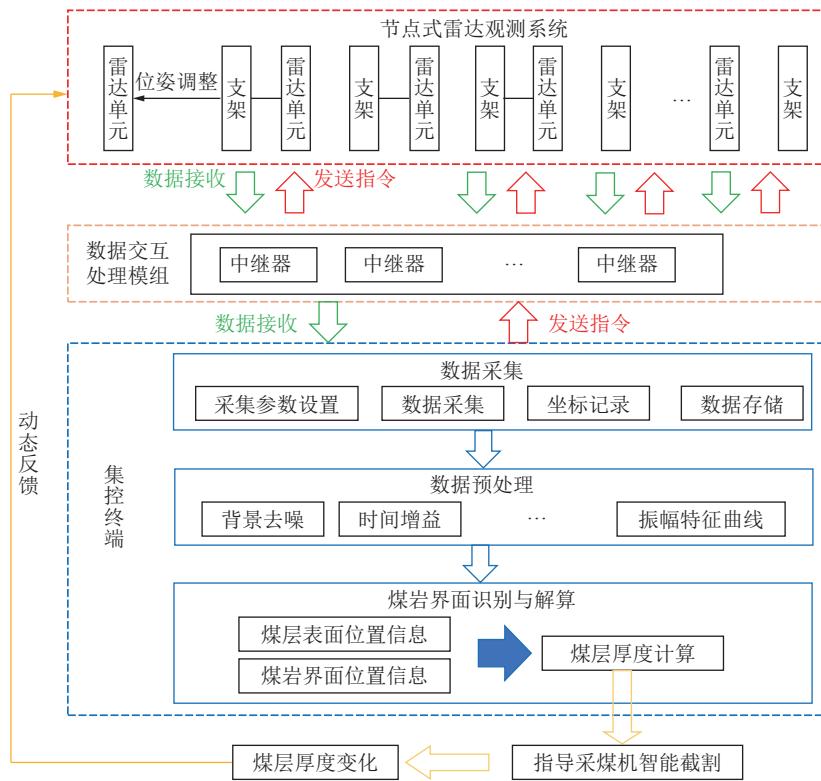
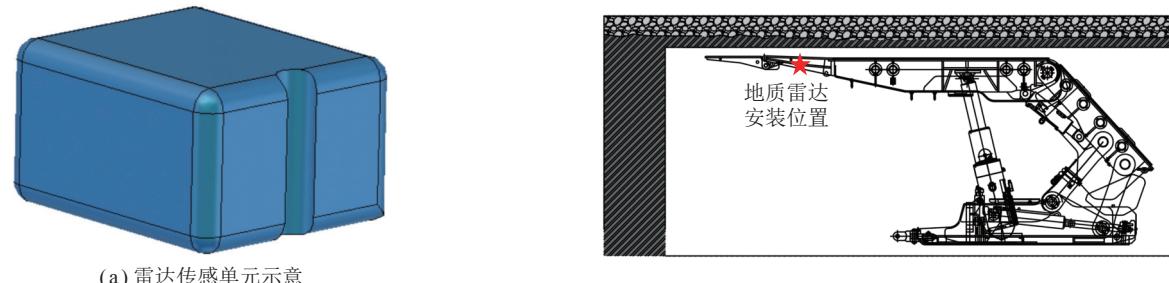


图2 节点式雷达快速动态探测技术架构

Fig.2 Technical architecture diagram of nodal radar rapid dynamic detection



(a) 雷达传感单元示意

(b) 天线方向

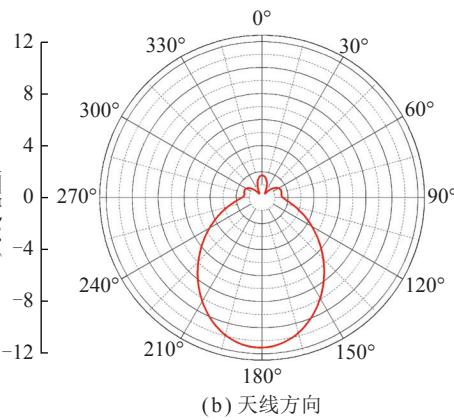


图3 雷达传感单元示意及天线方向结果

Fig.3 Schematic diagram of radar sensing unit and antenna pattern simulation results

2 数据快速处理与煤岩界面识别算法

2.1 矿井煤岩界面雷达波特征分析

为研究适用于单道雷达波的数据处理方法与煤

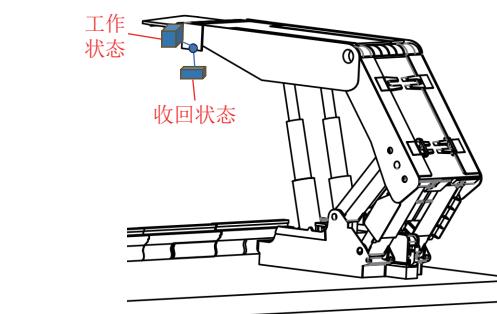


图4 节点式雷达单元安装位置示意

Fig.4 Nodal radar unit mounting position schematic

岩界面识别算法,通过GPRMax仿真软件建立一个煤岩界面数值模型,用于分析煤岩界面雷达波特征以及验证节点式雷达数据处理方法与煤岩界面识别算法。煤岩界面模型由煤炭和围岩两种介质组成,存在电常数差异,从而形成波阻抗界面,电磁波在穿过煤岩界面时遇到波阻抗界面,并在波阻抗界面上产生反射波、透射波、和折射波。煤岩界面数值模型如图5(a)所示,

模型煤层最厚位置 15.5 cm, 最薄处 3 cm, 雷达传感单元在煤层表面进行连续和节点式探测采集雷达数据, 根据接收到的电磁波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度与波形资料, 可推断煤表面、煤-岩界面分布情况。

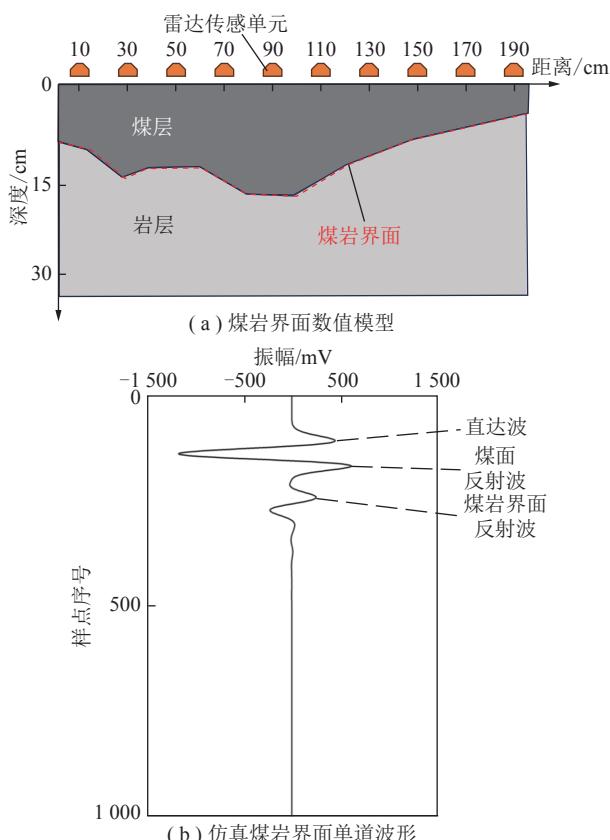


图 5 煤岩界面数值模型与单道波形

Fig.5 Numerical model of coal rock interface and single waveform

从单道雷达波正演结果(图 5(b))看出, 矿井煤岩界面的雷达波传播途径, 从发射天线中辐射出电磁波, 一部分直接被接收天线接收, 一部分到达顶板煤表面发生反射和透射, 煤表面反射波经过“天线—地面”的双程旅行时后被接收天线接收; 同理, 煤岩界面的反射波经过“天线—地面—煤岩界面”的双程旅行时后被接收天线接收; 虽然电磁波会在介于空气层与岩层之间煤层多次反射, 但是其能量是不断衰减的, 相对于一次波能量较小, 且返回接收天线时间更长, 一道矿井煤岩界面雷达波随着时间推移, 应该首先是直达波分布, 其次是煤表面反射波, 最后是煤岩界面反射波。

2.2 数据处理方法

为了更好使用模拟数据验证节点式探测方法的可行性, 参考真实探地雷达数据对仿真数据加入随机噪音以及雷达单元脉冲噪音进行数据处理, 节点式采集仿真原始数据如图 6 所示。

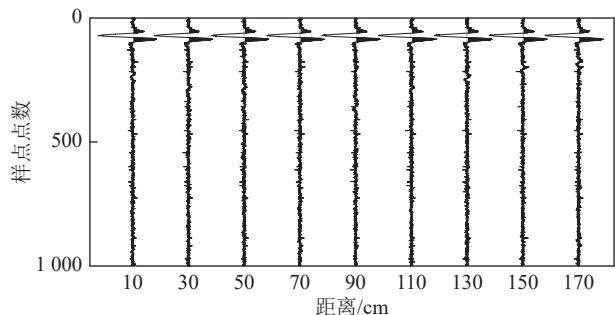


图 6 节点式采集仿真原始数据

Fig.6 Nodal simulation raw data

2.2.1 单道信号叠加去噪

雷达传感单元在工作位置持续数据采集, 根据节点式方法数据采集特点, 对数据进行以下处理: 对雷达传感单元一定时间 T 内采集到的数据进行叠加, 用以压制随机噪音, 叠加公式为

$$T(j) = \sum_{i=1}^n \frac{g_i(j)}{n} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, L) \quad (1)$$

式中, $T(j)$ 为一段时间内的单道雷达数据叠加结果; j 为单道雷达数据上第 j 个样点; n 为当前 A-scan 参与叠加的总道数; i 为道序号; L 为每道数据总采样点的个数。

采集的单道波形可能会因为环境或者电路干扰存在较多随机噪音, 从图 7 可以看到, 雷达单元单道波形在叠加后可以有效压制随机噪音, 提高信噪比, 使煤岩界面的一次反射波更容易分辨。

2.2.2 背景信号去除

除随机噪音之外, 本身由天线结构与发射机与接收机电路引起的规则噪音也会影响分辨煤岩界面反射波, 造成煤岩界面误判, 直达波也会与地面波叠加在一起, 导致计算出煤层厚度存在误差, 由于煤岩层位起伏较缓, 在雷达图谱上同相轴几乎水平, 在使用当前主流数据处理方法时, 如中值滤波、小波变换、频率域滤波方法可以压制或去除直达波以及规则噪音的影响, 但是一般会将表面波与直达波一起压制去除, 对于层位起伏较缓, 近乎水平的煤岩界面, 会导致来自煤岩界面的反射波一起被压制, 不利于煤岩界面识别, 所以在矿井节点式雷达观测系统里, 以雷达单元在空旷环境下(附近不会有反射源)采集到的仪器自身和环境的数据作为背景信号对煤岩界面数据进行背景去噪, 如图 8 所示, 使用采集背景信号去除背景噪音, 可以有效去除直达波以及雷达系统自身产生的信号干扰, 保留地面反射波和煤岩界面反射波。

$$t(j) = T(j) - T_b(j) \quad (j = 0, 1, 2, \dots, L) \quad (2)$$

式中, $t(j)$ 为经过背景去噪的单道雷达波; $T_b(j)$ 为采集的背景信号。

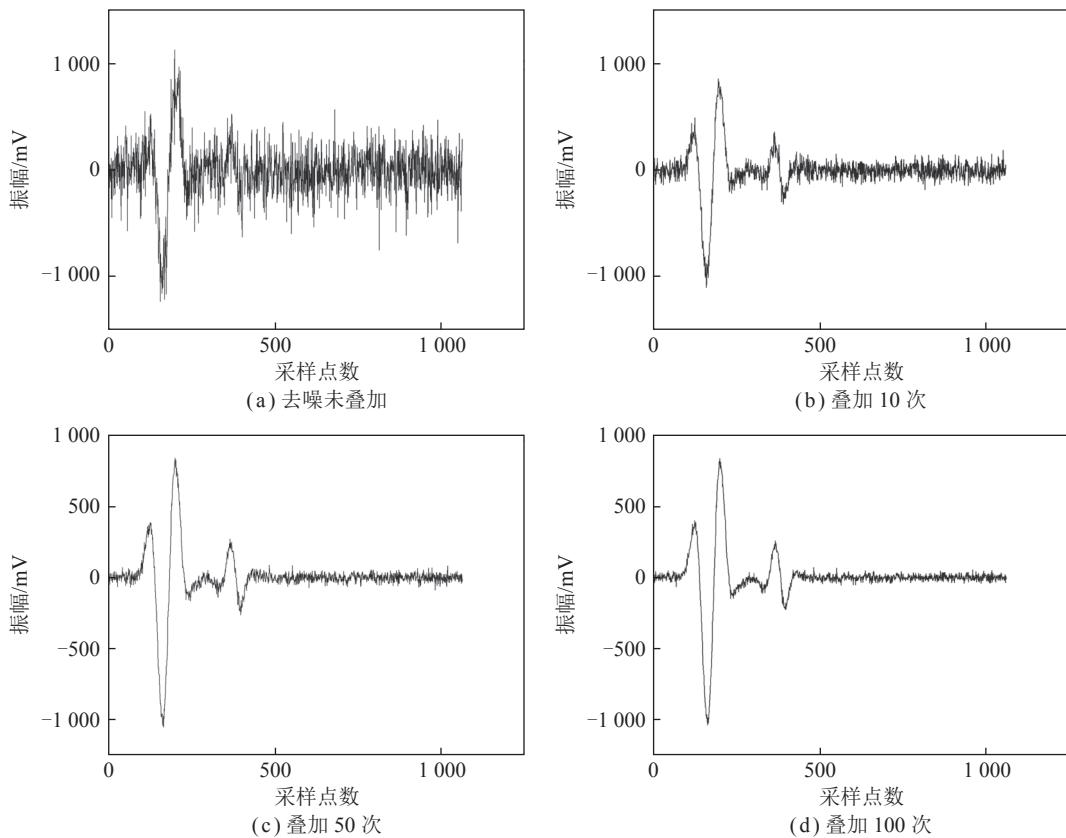


图 7 单道信号不同叠加次数对比

Fig.7 Comparison of the number of different superimpositions of a single channel signal

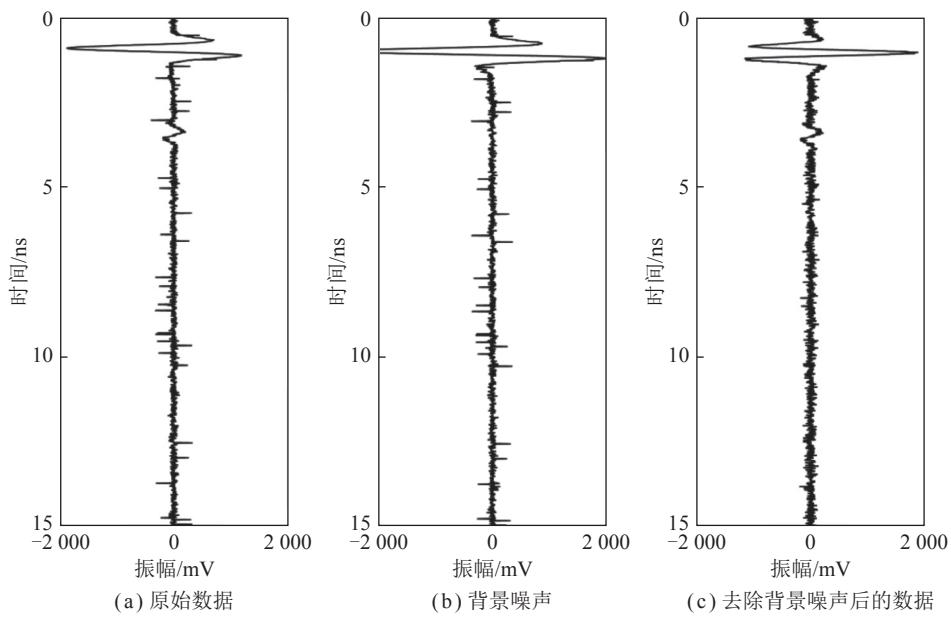


图 8 原始信号、背景噪声、去除背景噪声数据对比

Fig.8 Comparison of raw signal, background noise, and background noise removal data

2.2.3 增益处理

电磁波在地下传播时能量衰减较快, 来自煤岩界面的反射波振幅较小, 这个问题通常采用时间增益方法来恢复波形, 对经过背景去噪的雷达信号进行适当的增益有助于更清晰地观察波形。煤岩界面的探测

可以认为是一个简单的煤炭-围岩双层模型, 地质模型简单, 所以在这里采用指数补偿增益作为增益曲线, 指数补偿增益曲线函数 $f(j)$:

$$f(j) = ca^{j/e^2-b} + 1 \quad (f_{\max}(j) = 20; j = 0, 1, 2, \dots, L) \quad (3)$$

式中, a 、 b 、 c 均为常数, 用于控制增益曲线形态。

对雷达单道波进行增益, 增益公式为

$$t_z(j) = t(j)f(j) \quad (j = 0, 1, 2, \dots, L) \quad (4)$$

如图9所示, 经过增益的单道雷达波地面波振幅和煤岩界面反射波均被均衡了, 煤面界面反射波更容易在单道波中观测。

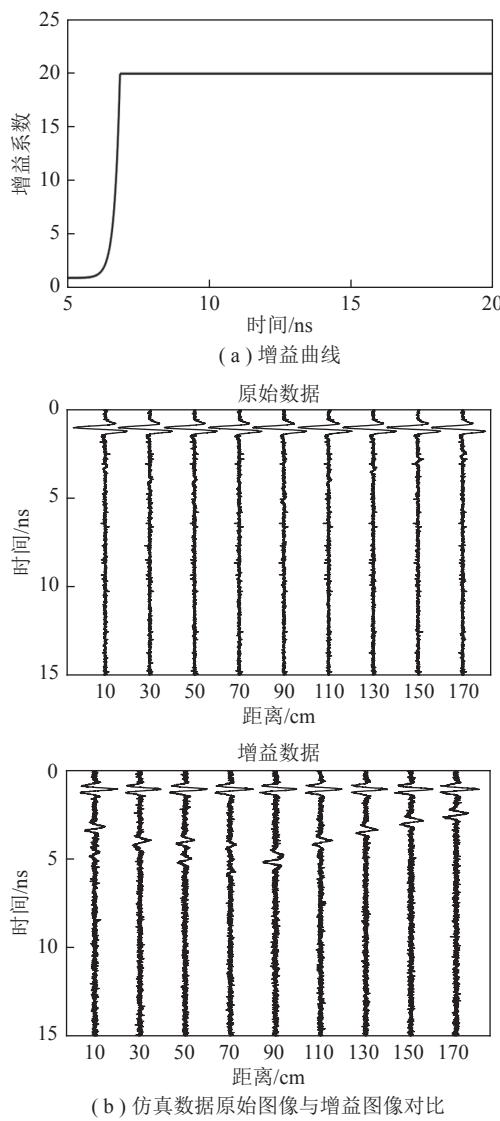


图9 增益曲线及原始图像与增益图像对比

Fig.9 Gain curves and comparison of original image and gain image

2.3 煤岩界面反射波拾取算法

采集到原始单道数据, 通过叠加去噪、背景信号去除、增益处理流程后, 计算单道波振幅特征曲线, 再以相对高差为判定条件拾取表面反射波与煤岩界面反射波对应的振幅特征曲线峰值点, 获得表面反射波与煤岩界面反射波所在位置对应样点, 通过样点计算表面反射波与煤岩界面反射波的双程旅行时间, 再结合煤层介电常数计算煤层厚度。

针对单道雷达数据 $t_z(j)$ 选取样点数量为 T_2 的一

个时窗, 时窗等分成2部分 $[T_0, T_1], [T_1, T_2]$, 计算前后时窗内振幅绝对值之和的比值, 根据比值的最大值确定地面反射波所在的时窗, 最后在该时窗内拾取地面反射波。拾取地面反射波后跳过已拾取的时窗继续拾取煤岩界面的反射波, 振幅比 E_R 公式为

$$E_R = \sum_{j=T_1}^{T_2} |t_z(j)| / \sum_{j=T_0}^{T_1} |t_z(j)| \quad (5)$$

时窗大小选取直接影响振幅特征曲线对目标回波的突显程度, 合适的时窗大小会生成反射波振幅特征明显的振幅特征曲线, 有利于煤岩界面反射波的拾取, 图10为不同时窗下的振幅特征曲线。

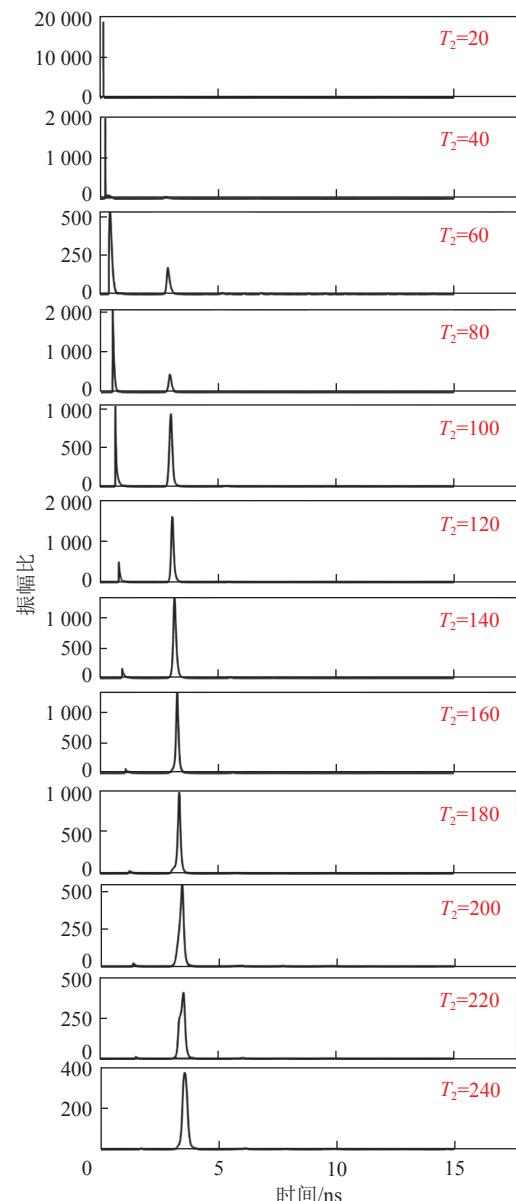


图10 不同时窗下的单道波振幅特征曲线

Fig.10 Characteristic curves of single channel wave amplitude under different time windows

窗口每移动一次生成一个振幅比值, 经过一个测线后所有的振幅比值生成一个振幅特征曲线, 单道数据振幅特征曲线如图 11 所示。图 11 中红点为振幅特征曲线中 2 个局部峰值点, 振幅特征曲线会使地面反射波和煤岩界面反射波在其所在位置的局部区域对应的特征更加突出, 以相对高差为判定条件拾取振幅特征曲线峰值点, 获得峰值点所在样点位置, 完成对地面反射波和煤岩界面反射波双程旅行时间的拾取。

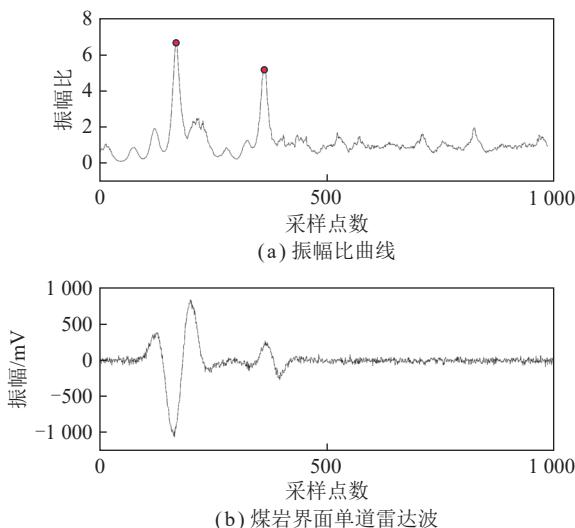


图 11 单道数据波形与振幅特征曲线

Fig.11 Single-channel data waveforms and amplitude characteristic curves

2.4 煤岩界面定位与煤层厚度计算

电磁波真空中传播速度为 $c=3\times10^8 \text{ m/s}=30 \text{ cm/ns}$ 。在煤层中的传播速度 v 为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

式中, v 为电磁波在介质中的传播速度; c 为电磁波在真空中的传播速度, $c=3\times10^8 \text{ m/s}$; ϵ_r 为煤层中的相对介电常数 ($\epsilon_r=\epsilon/\epsilon_0$), ϵ 为煤的介电常数, ϵ_0 为真空介质的介电常数。

天线采样时窗设置为 T_w , 采样时窗内的采样点数为 N , 采样间隔为

$$\Delta t = \frac{T_w}{N-1} \quad (7)$$

式中, Δt 为采样间隔。

假设识别的煤岩界面波采样点为 n_1 , 时间为 t_1 , 根据双程旅行时原则, 煤岩界面对应于雷达剖面上的位置距离 Z 为

$$t_1 = n_1 \Delta t \quad (8)$$

$$Z = \frac{t_1 v}{2} \quad (9)$$

式中, t_1 为煤岩界面波所在位置时间; n_1 为煤岩界面波所在位置采样点; Z 为煤岩界面所在位置距离。

对于煤层厚度, 假设煤表面波采样点为 n_0 , 所在时间点为 t_0 , 根据双程旅行时原则从煤层表面到煤岩界面所用时间 t 为

$$t = t_1 - t_0 = (n_1 - n_0) \Delta t \quad (10)$$

那么可得测量煤层 H_0 为

$$H_0 = \frac{(t_1 - t_0)V}{2} = \frac{(n_1 - n_0)\Delta t V}{2} \quad (11)$$

如图 12 所示, 通过节点式采集方法采集 9 道模拟数据, 依次对每一道数据绘制振幅特征曲线, 再以相对高差为判别基础拾取, 每一道数据地面波与煤岩界面反射波对应的样点数, 样点数在经过时间换算便可计算煤层厚度, 即可得每个采集点位处的煤层厚度以及煤岩界面趋势。

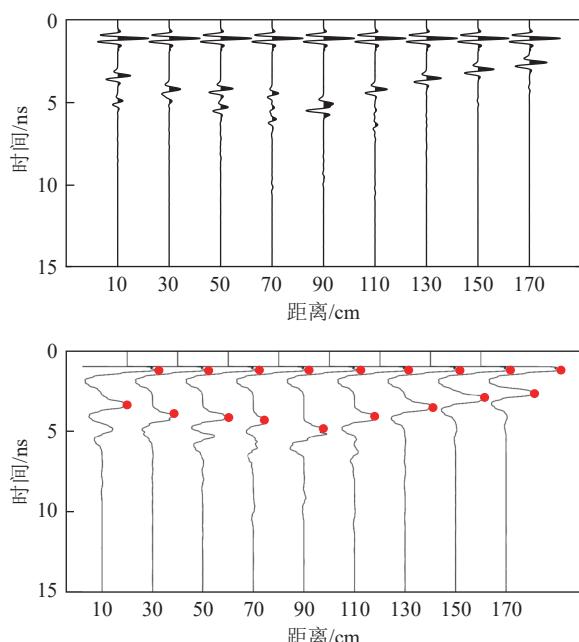


图 12 节点式采集数据不同界面反射波拾取

Fig.12 Nodal acquisition data reflected wave pickup at different interfaces

3 模型实验与误差分析

3.1 物理模型实验

为检验节点式探测方法对煤岩界面探测效果, 搭建了物理实验模型, 如图 13 所示, 其中煤岩物理模型大小为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$, 下部分填充煤, 介电常数约为 5.5, 上部分为填充沙砾和石膏混合物, 介电常数约为 9。选用笔者团队自主研发的探地雷达作为雷达传感单元组成节点式雷达采集系统, 天线中心频率为 1500 MHz , 在煤岩物理模型上共布置 11 个采集点,

采集点之间的间隔设置为 20 cm, 为防止 2 个天线之间信号干扰, 11 个点位数据采集分为 3 次进行采集, 如图 13 中天线在位置 (1、3、5、7、9) 放置, 天线与天线之间放置吸波材料, 减少天线之间的相互干扰。

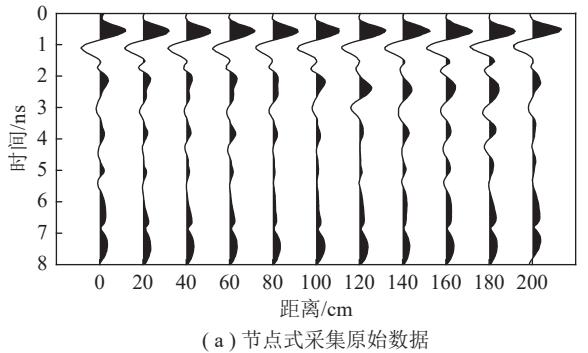


图 13 煤岩界面物理模型

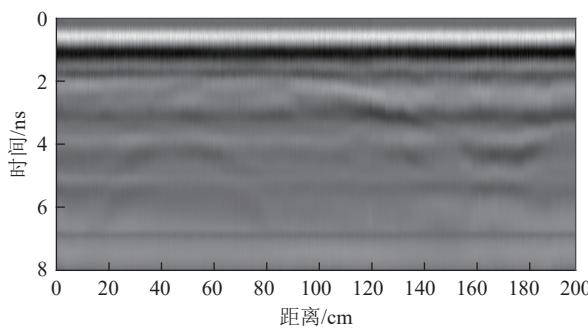
Fig.13 Physical modeling of the coal-rock interface

每个雷达单元采样时窗设置为 8 ns, 采集样点数 $N=512$, 各采集点采集时长 10 s, 对每个点位采集 3 000 道数据后进行叠加处理形成一道数据。经过 3 次数据采集, 11 个采集点位共得到 11 道叠加数据。为对比本文提出的煤岩界面节点式探测方法与前文提出煤岩界面随采动态探测方法对煤岩界面的探测效果, 以连续测量模拟随采探测方法, 分析对比 2 种方法煤岩界面探测误差以及评价 2 种方法的优缺点。节点式采集原始数据如图 14(a) 所示, 连续式采集原始数据如图 14(b) 所示。

对叠加的单道数据进行背景去噪与增益处理, 绘制每一道数据的振幅特征曲线, 以相对高差为判定条件拾取表面反射波与煤岩界面反射波对应的振幅特征曲线峰值点, 获得表面反射波与煤岩界面反射波所



(a) 节点式采集原始数据



(b) 连续式采集原始数据

Fig.14 Experimental raw data

在位置对应样点, 从而获取煤表面与煤岩界面反射波信息, 节点式雷达实验数据煤表面与煤岩界面反射波拾取如图 15 所示。

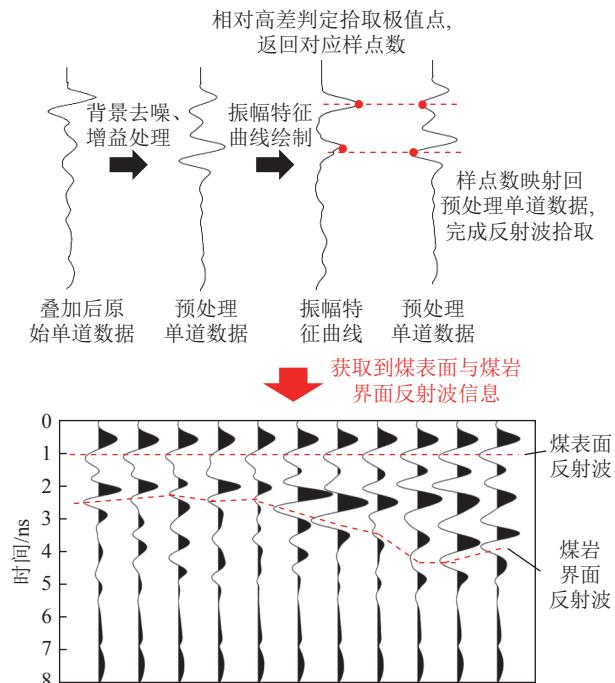


图 15 节点式雷达实验数据反射波拾取

Fig.15 Nodal GPR experimental data reflection wave pickup

3.2 误差分析

分别获得对应表面波位置的样点集合 N_0 和煤岩界面反射波对应的样点集合 N_1 , 利用式 (14) 计算每个点对应的煤层厚度 (图 16(a)) 并计算每个点测量深度和实际深度的绝对误差值 (图 16(b)), 节点式探地雷达采集数据中平均误差约为 1.07 cm, 最大误差为 5.6 cm, 考虑到除去最后一个点位煤层厚度误差最大, 其他点位误差较小, 结合测试环境, 判断雷达传感单元在最后一个点位测量时受到支撑模型的金属制件干扰, 导致层位识别样点选取出现较大误差, 从而导致最后一个点位对煤岩界面的识别误差较大, 除此点异常误差之外, 最大误差为 1.47 cm。

为更好的指导采煤机在工作过程中可以更精确的对采集机截割高度进行调整, 现将以节点式采集的数据进行插值与物理模型下的煤层厚度进行误差分析, 分别采用线性插值法和 3 次样条插值法对节点式雷达数据进行插值。

由 11 道数据扩充到 110 道数据 (图 17), 并对插值结果进行误差分析。由图 17 可知, 2 种插值方法通过有限的煤岩界面信息均可以较好的展现出模型的煤岩界面深度信息和界面变化趋势, 但是对于煤岩物理模型, 3 次样条插值方法在煤岩界面起伏较大时更贴合实际, 对 2 种插值方法精度以平均绝对百分比误

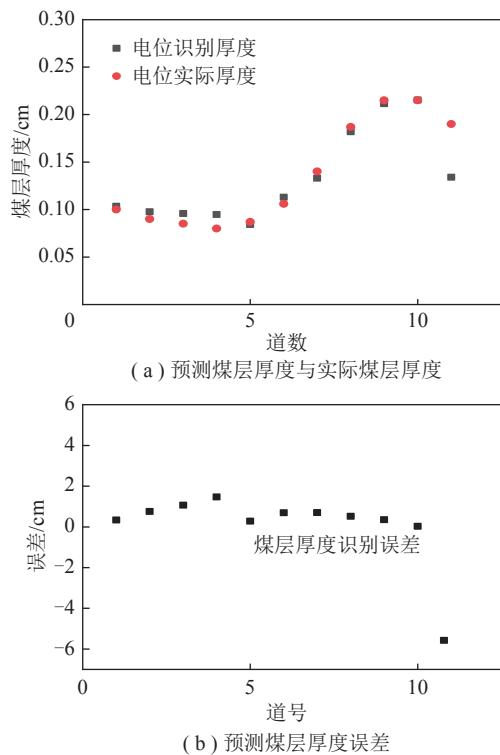


图 16 预测煤层厚度与实际煤层厚度对比及误差

Fig.16 Comparison and error of identified coal seam thickness and actual coal seam thickness

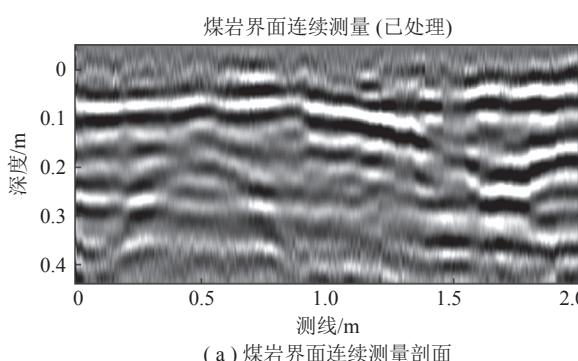
差 E_{MAP} 进行对比, 有

$$E_{MAP} = \frac{100\%}{p} \sum_{k=1}^p \frac{y_{real}(k) - y(k)}{y_{real}(k)} \quad (12)$$

其中, p 为插值后的总样点数; k 为插值后的第 k 个样点; $y_{real}(k)$ 为煤岩界面真实深度信息; $y(k)$ 为经过插值

表 1 测量煤层厚度以及误差
Table 1 Coal seam thickness and error

标记号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
煤层厚度/cm	10.0	9.0	8.5	8.0	8.7	10.6	14.0	18.7	21.5	21.5	19.0
测量煤层厚度/cm	10.33	9.76	9.56	9.47	8.42	11.29	13.7	18.18	21.14	21.52	13.39
误差值/cm	0.330	0.760	1.060	1.470	-0.280	0.690	-0.300	-0.520	-0.360	0.028 0	-5.610



(a) 煤岩界面连续测量剖面

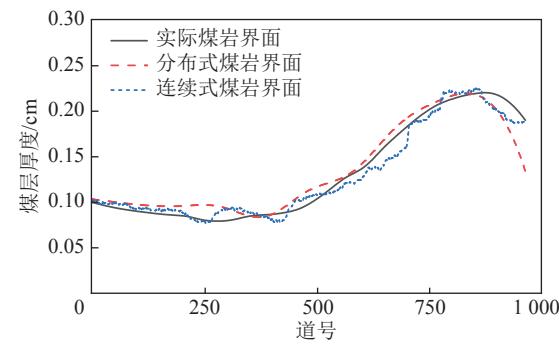


图 18 节点式观测系统与连续测量观测系统探测误差对比

Fig.18 Comparison of detection errors between nodal observation systems and continuous measurement observation systems

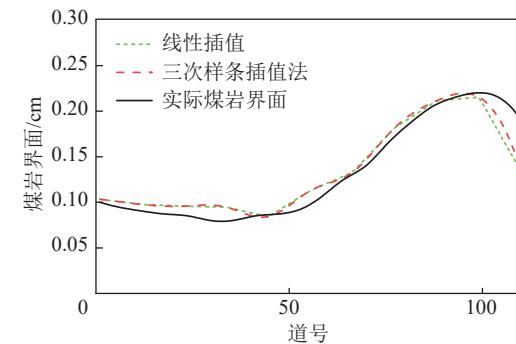


图 17 不同煤岩界面曲线插值方法对比

Fig.17 Comparison of different coal-rock interface curve interpolation methods

的识别到的煤岩界面深度信息。经计算,由节点式雷达采集数据所得的煤岩界面深度信息,经过线性插值与真实煤岩界面平均绝对百分比误差为 10.74%, 经过 3 次样条插值的结果与真实煤岩界面平均绝对百分比误差为 7.64%, 3 次样条插值方法精度更高, 具体见表 1。

如图 18(a) 所示, 连续测量相比较于节点式雷达采集的数据具有更多的细节, 更容易观测到煤岩界面, 现从连续测量结果中取得煤岩界面位置信息, 与节点式雷达采集的煤岩界面位置信息做误差分析, 图 18(b) 为连续测量与节点式探测煤岩界面曲线以及实际煤岩界面曲线对比。经过使用连续测量结果与真实煤岩界面平均绝对百分比误差为 5.75%, 平均绝对误差为 0.73 cm, 最大绝对误差值为 2.41 cm。经过 3 次样条插值的节点式雷达探测结果与真实煤岩界面的平均相对百分比误差为 7.64%, 平均绝对误差值 1.07 cm,

最大绝对误差为 5.6 cm。连续测量煤岩界面识别精度略高于节点式雷达探测煤岩界面识别精度。

4 结 论

(1) 阐述矿井节点式雷达探测系统原理, 根据矿井工作面实际环境设计煤岩界面识别观测系统方案及雷达传感单元安装方式; 提出了节点式采集控制系统和信息交互传输设计方案, 数据动态采集控制及存储。

(2) 针对节点式采集方式及煤岩界面雷达反射回波特征, 研究提出了单道雷达传感单元探测数据增强处理方法、煤岩界面识别算法, 可有效的实现煤岩界面识别与追踪、煤层厚度及空间坐标解算。

(3) 通过物理煤岩模型验证了矿井节点式雷达观测系统的煤岩界面动态识别方法的可行性, 实验结果显示节点式探测方法的煤岩界面动态识别方法识别到的煤层界面平均误差约为 1.07 cm, 除去异常误差外, 最大误差为 1.47 cm, 煤层界面样点经过 3 次样条插值后, 与真实煤岩界面平均绝对百分比误差为 7.64%, 与连续采集探测的煤岩界面平均相对百分比误差为 7.93%, 平均相对误差为 0.94 cm。与连续采集方法相比, 本文提出的节点式探测方法一定程度上解决了矿井煤岩界面随采动态探测中存在的探测设备安全风险问题, 并可实现数据的快速动态重复性采集, 单次采集时长控制在 10 s 以内, 本方法为矿井智能化开采中煤岩界面的动态高精度探测提供新的技术方法。

当前本方法还处于实验阶段, 在实际工作中采集数据点少、数据连续性差, 常规的种子点拾取和层位追踪方法均不能直接应用, 给节点式雷达观测数据的智能处理和解译带来较大的挑战, 下一步的工作要重点研究开发煤岩界面的智能识别方法, 提高识别结果的准确性和鲁棒性。

参考文献(References):

- [1] 袁亮, 吴劲松, 杨科. 煤炭安全智能精准开采关键技术与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 861–868.
YUAN Liang, WU Jingsong, YANG Ke. Key technology and its application of coal safety intelligent precision mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 861–868.
- [2] 袁亮. 煤炭工业碳中和发展战略构想[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 103–110.
YUAN Liang. Strategic conception of carbon neutralization in coal industry[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 103–110.
- [3] 康红普, 任世华, 王保强, 等. 煤炭工业数字化发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(6): 170–178.
KANG Hongpu, REN Shihua, WANG Baogang, et al. Digital development strategy of coal industry[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 170–178.
- [4] 王国法, 张建中, 薛国华, 等. 煤矿回采工作面智能地质保障技术进展与思考[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 12–26.
WANG Guofa, ZHANG Jianzhong, XUE Guohua, et al. Progress and reflection of intelligent geological guarantee technology in coal mining face[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 12–26.
- [5] GE Shirong, XUE Guanghui, REN Huaiwei, et al. Development of intelligent technologies and machinery for coal mining in China's underground coal mines[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2023, 25(5): 146–156.
- [6] 康红普, 王国法, 王双明, 等. 煤炭行业高质量发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 130–138.
KANG Hongpu, WANG Guofa, WANG Shuangming, et al. High-Quality development of China's Coal Industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130–138.
- [7] 葛世荣, 张晞, 薛光辉, 等. 我国煤矿煤机智能技术与装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 146–156.
GE Shirong, ZHANG Xi, XUE Guanghui, et al. Development of intelligent technologies and machinery for coal mining in China's underground coal mines[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 146–156.
- [8] 田立勇, 戴渤海, 王启铭. 基于采煤机摇臂销轴多应变数据融合的煤岩识别方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1203–1210.
TIAN Liyong, DAI Bohong, WANG Qiming. Coal-rock identification method based on multi-strain data fusion of shearer rocker pin shaft[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1203–1210.
- [9] 田立勇, 毛君, 王启铭. 基于采煤机摇臂惰轮轴受力分析的综合煤岩识别方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 782–787.
TIAN Liyong, MAO Jun, WANG Qiming. Coal and rock identification method based on the force of idler shaft inshearer's ranging arm[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 782–787.
- [10] TIAN M, LI Q, XV C, et al. Coal-rock Interface Recognition Method Based on GAF-deep Learning[C]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 2021: 4029–4033.
- [11] ZHANG Q, CAO Y, ZHANG J. Research on coal-rock interface recognition based on active infrared excitation[J]. World of mining-Surface & Underground, 2021.
- [12] ZHANG Q, LIU J, GU J, et al. Study on coal-rock interface characteristics change law and recognition based on active thermal excitation[J]. European Journal of Remote Sensing, 2022, 55: 35–45.
- [13] WANG Xin, HU Kexiang, ZHANG Lei, et al. Characterization and classification of coals and rocks using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2017(38): 248–260.
- [14] YU J, WANG X, DING E, et al. A novel method of on-line coal-rock interface characterization using THz-TDs[J]. IEEE Access, 2021(9): 25898–25910.
- [15] 杨恩, 王世博, 葛世荣, 等. 煤岩界面的高光谱识别原理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 646–653.
YANG En, WANG Shibo, GE Shirong, et al. Study on the principle of hyperspectral recognition of coal-rockinterface[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 646–653.
- [16] 吕渊博, 王世博, 葛世荣, 等. 近红外光谱煤岩识别装置研制[J]. 工

- 矿自动化, 2022, 48(7): 32–42.
- LYU Yuanbo, WANG Shibo, GE Shirong, et al. Development of coal and rock identification device based on near-infrared spectroscopy[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(7): 32–42.
- [17] 杨文萃, 邱锦波, 张阳, 等. 煤岩界面识别的声学建模[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(3): 100–103.
- YANG wencui, QIU Jinbo, ZHANG Yang, et al. Acoustic modeling of coal-rock interface identification[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3): 100–103.
- [18] 李彦明, 孙利海. 基于多源异构信息耦合的煤岩界面识别技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(5): 6–10.
- LI Yanming, SUN Lihai. Research on coal-rock interface recognition technology based on multi-source heterogeneous information coupling[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(5): 6–10.
- [19] 柳圆, 司垒, 王忠宾, 等. 基于电磁波的煤岩识别技术研究进展[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 42–48, 65.
- LIU Yuan, SI Lei, WANG Zhongbin, et al. Research progress on coal rock recognition technology based on electromagnetic waves[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 42–48, 65.
- [20] 许献磊, 彭苏萍, 马正, 等. 基于空气耦合雷达的矿井煤岩界面随采动态探测原理及关键技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 2961–2977.
- XU Xianlei, PENG suping, MA Zheng, et al. Principle and key technology of dynamic detection of coal-rockinterface in coal mine based on air-coupled radar[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2961–2977.
- [21] ZHU P, XU X, MA Z, et al. Research on accuracy and error analysis of coal and rock strata detection based on air-coupled GPR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1–5.