

10-25-2024

Spatial surveying characteristics and reconstruction method of millimetre wave radar in complex environment of coal mine roadway

XUE Xusheng

College of Mechanical and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Detection and Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China, xuexsh@xust.edu.cn

YANG Xingyun

College of Mechanical and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Detection and Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China, 15700971803@163.com

YUE Jianing

College of Mechanical and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Detection and Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

XUE Xusheng, YANG Xingyun, YUE Jianing, et al. (2024) "Spatial surveying characteristics and reconstruction method of millimetre wave radar in complex environment of coal mine roadway," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 52: Iss. 10, Article 18.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.24.05.0347

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss10/18>

This Drilling Engineering is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Spatial surveying characteristics and reconstruction method of millimetre wave radar in complex environment of coal mine roadway

Authors

XUE Xusheng, YANG Xingyun, YUE Jianing, WANG Chuanwei, MAO Qinghua, MA Hongwei, and WANG Rongquan



移动阅读

薛旭升, 杨星云, 岳佳宁, 等. 煤矿巷道空间毫米波雷达测量特性与重建方法[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 186-194.
doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.05.0347

XUE Xusheng, YANG Xingyun, YUE Jianing, et al. Spatial surveying characteristics and reconstruction method of millimetre wave radar in complex environment of coal mine roadway[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 186-194.
doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.05.0347

煤矿巷道空间毫米波雷达测量特性与重建方法

薛旭升^{1,2}, 杨星云^{1,2,*}, 岳佳宁^{1,2}, 王川伟^{1,2}, 毛清华^{1,2}, 马宏伟^{1,2}, 王荣泉³

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学陕西省矿山机电装备智能检测与控制重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安重装韩城煤矿机械有限公司, 陕西 韩城 715400)

摘要: 【目的】煤矿井下空间测量是煤矿透明地质建模的重要组成部分, 然而煤矿巷道环境复杂、信息获取不全、感知数据精度不足等难题亟待解决。【方法】首先, 深入研究粉尘、水雾、围岩结构等复杂环境因素下毫米波雷达信号特性, 建立煤矿巷道围岩毫米波信号衰减模型, 对比分析复杂环境因素毫米波雷达的影响机理。其次, 针对煤矿复杂环境下毫米波雷达的巷道数字建模问题, 提出巷道空间毫米波雷达点云泊松表面重建方法。通过实验测试与模拟巷道环境验证, 在揭示煤矿复杂环境条件下的毫米波雷达感知机理基础上, 实现了煤矿巷道空间测量与数字建模重构。【结果和结论】结果表明: (1) 毫米波雷达能够适应煤矿井下多粉尘、多水雾、围岩粗糙的巷道环境, 为煤矿巷道空间重建提供有效数据。(2) 泊松表面重建方法能够充分展示真实巷道围岩信息, 重建巷道整体宽度的平均绝对误差百分比为 0.59%, 巷道整体高度的平均绝对误差百分比为 0.78%。煤矿复杂环境下毫米波雷达空间测量特性与重建方法的研究, 为煤矿井下透明地质建模提供巷道空间测量数据, 对推动煤矿智能开采具有重要意义。

关键词: 毫米波雷达; 复杂环境; 巷道建模; 空间测量; 煤矿

中图分类号: TD263 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2024)10-0186-09

Spatial surveying characteristics and reconstruction method of millimetre wave radar in complex environment of coal mine roadway

XUE Xusheng^{1,2}, YANG Xingyun^{1,2,*}, YUE Jianing^{1,2}, WANG Chuanwei^{1,2},
MAO Qinghua^{1,2}, MA Hongwei^{1,2}, WANG Rongquan³

(1. College of Mechanical and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Detection and Control, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an Heavy Industry Hancheng Coal Mining Machinery Co., Ltd., Hancheng 715400, China)

Abstract: [Objective] Underground spatial surveying of coal mine is an important part of transparent geological modelling for coal mine. However, the complex environment of coal mine roadway, incomplete information acquisition, insufficient accuracy of sensed data and other difficulties need to be urgently solved. [Methods] First, the signal characteristics of millimeter wave radar under the complex environmental factors such as dust, water mist, surrounding rock structure, etc. were studied in depth, the millimeter wave signal attenuation model was established for the surrounding rock of coal mine roadway, and the influence mechanism of complex environmental factors for millimeter wave radar was comparatively analyzed. Second, in view of the problem of millimeter wave radar based digital roadway modelling in the complex environment of coal mine, the Poisson surface reconstruction method based on millimeter wave radar point

收稿日期: 2024-05-23; 接收日期: 2024-07-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52374161, 52174150, 52174149); 国家重点研发计划项目(2022YFF0605300, 2023YFC2907603); 陕西省教育厅服务地方专项-产业化培育项目(23JC048); 西安市科技计划项目-高校院所科技人员服务企业项目(22GXFW 0067); 陕西省“两链”融合企业(院所)项目(2023-LL-QY-03)

第一作者: 薛旭升, 1987年生, 男, 陕西兴平人, 博士, 副教授。E-mail: xuexsh@xust.edu.cn

*通信作者: 杨星云, 1995年生, 男, 山西朔州人, 硕士研究生。E-mail: 15700971803@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

cloud for the roadway space was proposed. Through experimental tests and simulated roadway environment verification, the spatial surveying and digital modelling reconstruction of the coal mine roadway was achieved on the basis of revealing the millimetre-wave radar sensing mechanism under the complex environmental conditions of the coal mine. [Results and Conclusions] The results show that: (1) The millimetre-wave radar could adapt to the underground coal mine roadway environment with a lot of dust, water mist and rough surrounding rock, and provide effective data for the spatial reconstruction of the coal mine roadway. (2) The Poisson surface reconstruction method could fully display the real information on surrounding rock of roadway, and the average absolute error percentage is 0.59% for the reconstructed total roadway width, and 0.78% for the total roadway height. Generally, the study of millimeter-wave radar spatial surveying characteristics and reconstruction methods in the complex environment of coal mines provides the spatial surveying data of roadway for transparent geological modelling of coal mines, which is of great significance in promoting the intelligent mining of coal mines.

Keywords: millimetre-wave radar; complex environment; roadway modelling; space surveys; coal mine

煤炭仍是我国主体能源, 国家能源局、国家矿山安全监察局等八部委联合印发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》, 提及煤矿巷道数字化建模成为煤矿智能开采的重要基础。然而, 煤矿巷道环境状态的不清、空间信息不精确等问题, 导致无法提升煤矿智能开采水平、人员与设备的安全保障水平等^[1-2]。先进的地质保障技术与装备是实现煤矿安全高效生产的重要前提, 需要精准探测技术及全息透明的数据信息^[3]。因此, 煤矿巷道空间精准测量与建模成为煤矿开采领域研究的热点问题。

基于三维激光扫描重建技术构建高精度透明工作面巷道模型的研究^[4], 并未充分考虑煤矿巷道多粉尘、水雾等复杂环境下激光雷达的适用性问题。煤矿井下环境复杂且伴随变化, 掘采机等煤矿井下设备在开采煤炭及加工、运输、装料等过程中产生各种煤尘与岩尘, 全尘粉尘质量浓度可达 500~600 mg/m³^[5], 高浓度的粉尘环境需要传感器具有一定的穿透能力和较强的鲁棒性; 煤矿井下环境经常处于高温高湿状态, 存在煤(岩)垮落、机械振动、意外冲击等其他因素^[6]; 煤矿巷道环境黑暗无光、空间狭长、多转角交叉, 巷道围岩凹凸不平, 对视觉传感影响较大且井下设备定位导航较为困难^[7]。可见复杂的环境条件都对传感器的鲁棒性、适应性的要求更加苛刻^[8]。因此需深入探究煤矿复杂环境因素对毫米波雷达信号的干扰问题, 有助于解决煤矿巷道空间建模精度低、信息失真等问题, 实现毫米波雷达煤矿巷道的精准测量与高精度数字化建模。

针对复杂环境问题, 国内外关于毫米波雷达在不同环境的感知性能均有研究。在烟雾、灰尘环境下, 毫米波雷达可以实现在不同烟雾环境下的实时重建, 可行且稳定^[9]。针对大型虚拟仿真环境下, 毫米波雷达可以建立实时功能模型, 精准地仿真模拟探测障碍物^[10], 探测精度满足功能要求。降雨对毫米波雷达产生信号衰减和反向散射的影响, 毫米波雷达的探测范围减小, 散射

效应存在显著差异^[11]。

毫米波雷达在目标检测和环境构建方面有广泛的研究, 由于毫米波雷达具有良好的探测能力、探测距离远范围大和交通态势感知能力, 特别用于交通道路、海港码头、机场等重要环境区域。毫米波雷达作为当下的研究热点, 适用于恶劣环境下的感知与三维重建, 是感知环境信息的主要来源之一。毫米波雷达可以提供环境 360° 的无死角视野, 实现智能避障、周围环境 2D 表示^[12], 也可用于即时定位与地图构建(SLAM)应用^[13]; 基于合成孔径雷达层析成像原理, 毫米波雷达可以构建建筑二面角结构的多径散射理论模型^[14-15], 实现城市建筑环境感知与建筑物高度的估计, 也可以提供建筑物背面丰富的信息^[16]。

在点云表面重建方面, 常见的方法包括网格曲面、隐式曲面和参数曲面重建^[17]。其中, 隐式曲面的泊松曲面重建由于能生成水密性好、几何特性和细节优秀的模型, 应用最为广泛^[18]。针对点云分布不均匀和存在空洞的问题, 可以采用泊松方程求解的重建方法, 通过填补空洞, 生成致密均匀的物体表面^[19], 保持系统的稀疏点结构不发生改变^[20]。泊松重建方法将有向点集的表面重建转化为空间泊松问题, 通过求解指示面的等值函数, 实现对点云的表面重建^[21]。

综上所述, 毫米波雷达凭借其优异的抗干扰和穿透性能广泛应用于目标检测和环境构建, 但有关于毫米波雷达在煤矿粉尘、水雾、巷道围岩等复杂环境下适应性的研究鲜有报道。为了探究毫米波雷达在煤矿复杂环境下的适用性与可行性, 通过实验模拟煤矿环境, 探究粉尘、水雾、巷道围岩等环境因素对毫米波雷达的影响机理。将毫米波雷达作为煤矿巷道环境感知的主要方式之一, 获取动/静态障碍物的坐标、轮廓、深度等信息, 最后通过泊松表面重建算法来实现精准巷道三维空间重构。毫米波雷达必将在煤矿等复杂环境的智能感知与自主决策中扮演关键角色, 对煤矿智能化建设具有重要意义和应用价值。

1 煤矿巷道空间环境特征分析

煤矿巷道环境复杂,通常具有相对狭小的空间,高温和潮湿的环境。由于地下环境的特殊性,煤矿巷道往往存在低照明条件,可能导致视觉受限和操作困难。煤矿巷道开采是一个动态变化的过程,巷道的形态和条件会发生变化并伴随粉尘。

毫米波雷达具有较强的鲁棒性、较好的穿透能力、高精度、全天时、全天候等特点,在生产实践中应用广泛。与其他传感器(如激光雷达、机器视觉等)相比较,具有高可靠、主动测量的特点,适用于煤矿井下复杂环境及昏暗的照明条件,目前主流传感器检测方法性能对比见表 1。

表 1 传感器检测方法性能对比
Table 1 Performance comparison of sensor based detection methods

检测方法	性能				
	探测距离	温度适应性	照度适应性	天气适应性	粉尘穿透性
毫米波雷达	优	优	优	优	优
激光雷达	优	优	优	弱	弱
视觉	弱	优	弱	弱	弱

1.1 水雾环境

在煤矿井下多水雾,水雾通常由于除尘工作过程中的水蒸发产生,巷道湿度高达 95% 以上。一般采用喷雾洒水的方法进行降尘处理^[22-23],在巷道顶部安装水幕支架,水幕支架上固定 2~3 个防尘喷雾喷头,构成净化水幕,来净化回风巷道内的风流,高压喷雾系统的水滴粒径普遍为 50~60 μm。毫米波雷达信号在传播过程中会被水雾吸收、反射、散射,进而造成毫米波的衰减和损耗。导致信号强度的衰减,从而影响毫米波传感系统的性能。

1.2 粉尘环境

粉尘是煤矿生产过程中所产生的各种矿物细微颗粒的总称,主要由煤炭和岩石的破碎、运输和处理等活动产生。煤矿在开采过程中会产生大量粉尘,综采(掘)机切割煤体时所产生的粉尘量也将明显增多,其采掘过程中粉尘量往往达到 300 mg/m³ 以上,掘进工作面粉尘粒径为 40~70 μm。粉尘颗粒会散射和吸收毫米波信号,导致毫米波信号强度的减弱^[24]。随着粉尘浓度增加,信号衰减效果会更加显著。可能导致信号干扰和多径衰落,影响雷达的测距和定位精度。

1.3 巷道空间结构环境

煤矿巷道狭长封闭,存在倾斜、弯曲、地面与侧壁粗糙、凹凸不平等问题。电磁波在井下传播规律不同于地面开阔环境,可能会经过多次折射、反射才能返回。

由于巷道围岩不是光滑表面,存在小角度变化,会对电磁波传输造成损耗,信号频率的不同也会引起不同程度衰减。

2 毫米波雷达信号的影响机理

2.1 巷道环境介质对毫米波雷达精度的影响机理

电磁波在传播过程中存在信号损耗和延迟。同样在巷道内也会受到粉尘、水雾影响,从而产生信号衰减与延迟现象。

粉尘和水雾具有极性,在外加电磁场的作用下会发生极化和偶极子振动。这种极性分子的振动会吸收部分电磁能量,导致信号幅度减小。吸收的强度与分子的极性强度和电磁场频率有关,遵循 Debye 电磁吸收理论^[25],吸收强度越大,信号衰减越严重。信号受到介质吸收衰减为:

$$\alpha_a = 8.686\beta\eta \tag{1}$$

当毫米波信号遇到粉尘和水雾微粒时,会发生麦克斯韦-米散射^[26](简称 Mie 散射理论)。微粒会将入射电磁波散射到各个方向,导致主要传播方向上的能量减少。散射强度与微粒尺度和电磁波波长的比值有关,遵循 Mie 散射理论。信号受到介质散射衰减为:

$$\alpha_s = 8.686\sigma_s/A \tag{2}$$

对于 Rayleigh 散射^[27],当粒子尺度 $d \ll \lambda$ 时:

$$A = \pi(\lambda/4\pi)^2 = \lambda^2/(16\pi) \tag{3}$$

随着频率升高, Rayleigh 散射效应越明显,散射衰减越严重。

总衰减系数为吸收衰减与散射衰减的叠加。

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \tag{4}$$

信号功率衰减为:

$$p_r = p_t \sqrt{2\alpha L} \tag{5}$$

吸收衰减和散射衰减共同造成了毫米波信号在粉尘、水雾环境中的总衰减。总衰减会导致信号功率大幅降低,信噪比下降。

另外从电磁场在频域中的传播表达式来描述,对粉尘、水雾对毫米波雷达目标距离测量精度影响进行理论计算,雷达发射的信号是频率随时间线性变化的调频信号。

信号随时间变化的频率为:

$$f_i(t) = f_0 + \frac{W_B}{t_s}t \tag{6}$$

信号通过介质到达距离 l 的目标,散射并反射回雷达接收,信号被延迟强度降低。然而,当涉及色散介质(如在粉尘、水雾等)时,由于延迟时间 Δt_s ,中频会发生移位:

$$\Delta f_{IF} = f_{IF} - f_m = 2 \frac{W_B}{t_s} \Delta t_1 \quad (7)$$

利用延迟 Δt_1 表达式:

$$\Delta t_1(f) = 2\pi \left(\frac{f}{c} \right)^2 \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \left[\alpha \left(\frac{\varepsilon''}{f_0} + \frac{1}{2} \frac{d\varepsilon''}{df} \right) + \beta \left(\frac{\varepsilon'}{f} + \frac{1}{2} \frac{d\varepsilon'}{df} \right) \right] - \frac{l}{c} \quad (8)$$

计算表示不同介质下的雷达距离测量误差 Δl :

$$\frac{\Delta l}{l} = c \frac{\Delta t_1(f_0)}{l} = 2\pi \left(\frac{f_0}{c} \right)^2 \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} \left[\alpha \left(\frac{\varepsilon''}{f_0} + \frac{1}{2} \frac{d\varepsilon''}{df} \Big|_{f_0} \right) + \beta \left(\frac{\varepsilon'}{f_0} + \frac{1}{2} \frac{d\varepsilon'}{df} \Big|_{f_0} \right) \right] - 1 \quad (9)$$

2.2 巷道围岩对毫米波雷达信号传播的影响机理

煤矿巷道由于掘进开采,造成围岩凹凸不平,电磁波在巷道传播过程中会入射到巷道围岩的粗糙表面而发生折射,造成电磁波信号的损耗。为了确定巷道围岩对 77~81 GHz 的毫米波雷达的影响情况,简化模型分析,本文采用巷道壁的粗糙系数为 Q ,均值为 0,方差为 σ^2 的高斯分布来描述巷道围岩表面的粗糙程度。 ΔH 为巷道围岩的平均高度, θ 为毫米波的入射角,如图 1 所示。

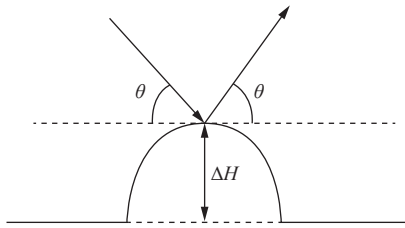


图 1 巷道围岩毫米波折射

Fig.1 millimetre-wave refraction map of the roadway surrounding rock

根据瑞利判断法, $\Delta H \gg \frac{\lambda}{8 \sin \theta}$, 一般认为巷道围岩表面是粗糙不平,单波模的入射角满足公式^[28]:

$$\sin \theta = \frac{k_x}{k_y} = \frac{\lambda}{2a} \quad (10)$$

由于 θ 值很小, $\sin \theta = \theta = \tan \theta$, 折射波的损耗参数 S 为:

$$S = \exp(-Q \sin^2 \theta) \quad (11)$$

$$Q = 4(k_0 \Delta H)^2 \quad (12)$$

根据以上公式,推导出毫米波信号的粗糙损耗为:

$$\alpha_r = 8.686\pi^2 (\Delta H)^2 \lambda \left(\frac{m^2}{a^4} + \frac{n^2}{b^4} \right) \quad (13)$$

3 基于毫米波点云的巷道空间重建方法

使用毫米波雷达采集的巷道点云存在部分缺失且较为稀疏。基于泊松方程的表面重建方法融合了全局

与局部拟合表面重建方法的优点^[29],全局性一次考虑所有点集的数据,泊松方法允许的层次结构支持局部的基函数,对稀疏系统有良好的普适性,毫米波点云泊松表面重建方法流程如图 2 所示。

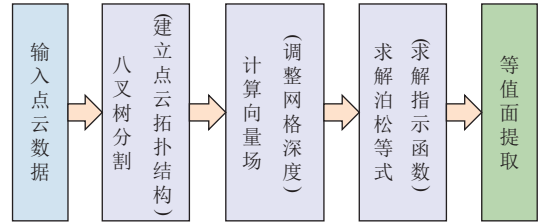


图 2 泊松表面重建方法流程

Fig.2 Flowchart of Poisson surface reconstruction method

为了精细结构缩小网格提高分辨率,在同等面积内增加网格模型面片数,采用自适应八叉树表示隐式函数对整个函数空间进行分割,进而解泊松系统^[30]。采用三次线性的插值方法为当前节点的 8 个邻近节点进行分配,指示函数所代表的表面梯度域的向量场就近似为:

$$V(q) \equiv \sum_{s \in S_p} \sum_{o \in N_{\text{nbr}}(s)} \alpha_{o,s} F_o(q) s \cdot N \quad (14)$$

在已知 V 的前提下反解泊松方程 $\Delta \chi = \nabla \cdot V$ 以得到表面的指示函数 χ 。为了保证 $\Delta \chi$ 和 $\nabla \cdot V$ 在同一函数空间,使得 $\Delta \chi$ 和 $\nabla \cdot V$ 在函数空间中的映射最为接近。即:

$$\sum_{o \in \partial} \|\langle \Delta \tilde{\chi} - \nabla \cdot V, F_o \rangle\|^2 = \sum_{o \in \partial} \|\langle \Delta \tilde{\chi}, F_o \rangle - \langle \nabla \cdot V, F_o \rangle\|^2 \quad (15)$$

重建表面的过程其实就是等值面提取的过程,为了得到输入点集所对应的表面 ∂M ,需要先选取等值面的一个阈值,选择等值对应的等值面应包含尽可能多的采样点,将所有点的位置作为参数估算结果求取平均值,提取等值面。

$$\partial M \equiv \{q \in R^3 | \tilde{\chi}(q) = R\} \quad (16)$$

$$R = \frac{1}{|S|} \sum_{s \in S} \chi(s \cdot p) \quad (17)$$

4 实验平台搭建与实验分析

4.1 实验平台搭建

环境模拟实验平台的功能是模拟真实巷道环境,采集被测目标样本数据、并传输到计算机进行保存,方便后续对毫米波信号进行分析,对毫米波点云进行处理。根据实验方案要求,环境模拟实验平台用于采集环境因素影响下的毫米波雷达点云特征。实验时,毫米波雷达到采集平面距离设定为 0.5 m,毫米波雷达参数见表 2。

表 2 毫米波雷达主要参数
Table 2 Main parameters of millimetre-wave radar

参数名称	传感器参数值
天线	三发四收
带宽/Hz	77~81
采样频率/Hz	4 884
方位角视场/(°)	±60
仰角视场角/(°)	±15
距离分辨率/cm	3.75

水雾、粉尘环境因素影响实验平台,以型材为框架结构,搭建亚克力板巷道模型,使用玻璃胶密封。通过调节粉尘质量来改变粉尘浓度,在模拟平台上方设置水雾发生装置,通过调节水雾设备的数量与喷头直径来实现不同粒径和不同喷洒面积的水雾环境,模拟巷道作业的实际情况。

实验环境为煤矿主体实验室模拟巷道,实验室模拟巷道宽度为 3.15 m,高度为 2.60 m,该环境为几乎无光的矩形巷道,能够满足煤矿巷道低纹理特征环境要求,巷道环境如图 3 所示。



图 3 模拟巷道实验环境(图像增强处理后)
Fig.3 Simulated experimental environment of roadway (after image enhancement)

4.2 环境因素对毫米波雷达特性影响分析

为探究粉尘、水雾等不同环境参数下毫米波雷达信号检测特性,通过分析毫米波雷达检测目标信息的结果,确定环境介质是否影响毫米波点云目标重建。

4.2.1 粉尘环境

静态实验通过调节粉尘质量浓度,等效空间中的不同粉尘质量浓度,采集过程中保持平台其他条件不变,实物如图 4 所示。涂抹的亚克力板视觉几乎无法穿透,可以作为静态悬浮粉尘浓度替代样本,效果较好。

静态实验采集 48、75 μm 粉尘不同质量浓度下的毫米波雷达信号,等效粉尘质量浓度分别为 0.5、1.0 g/m³,图 5 为无粉尘状态下采集的信号数据。静态条件下粒径 48、75 μm 粉尘在 0.5、1.0 g/m³ 质量浓度下,毫米波雷达信号均无明显变化,毫米波雷达信号数据如图 6 所示。

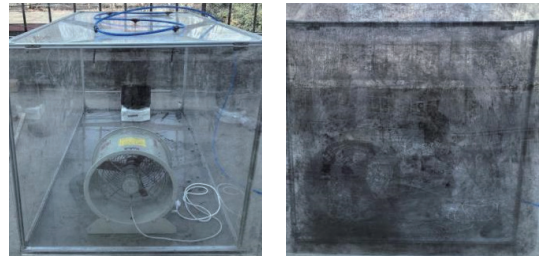


图 4 等效模拟实验实物
Fig.4 Equivalent simulated experiment object

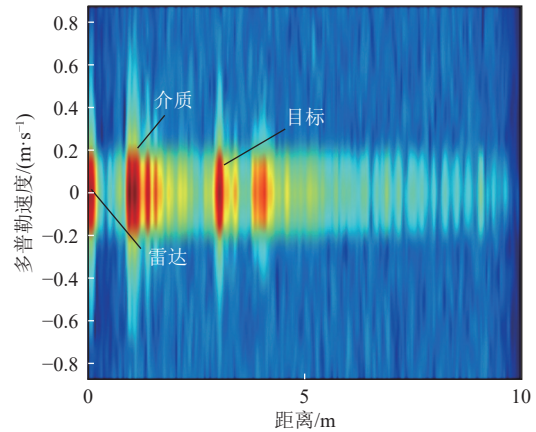


图 5 无粉尘状态下采集的信号数据
Fig.5 Signal data collected under dust-free state

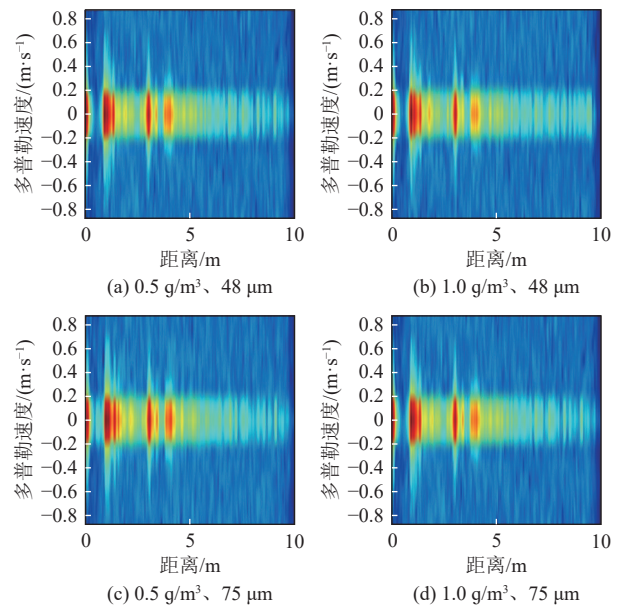


图 6 不同粉尘质量浓度和粒径下的静态采集信号数据
Fig.6 Signal data collected statically at different mass concentrations and particle sizes of dust

动态实验采用人工自然撒落方式,采集过程中保持其他条件不变。采集粒径为 48、75 μm 的粉尘不同质量浓度下的毫米波雷达信号,粉尘质量浓度分别为 0.5、1.0 g/m³,采集毫米波雷达信号数据如图 7 所示。48、75 μm 在人工自然撒落的情况下,质量浓度 0.5、1.0 g/m³ 均对毫米波雷达信号产生影响,可以检测到撒落位置与

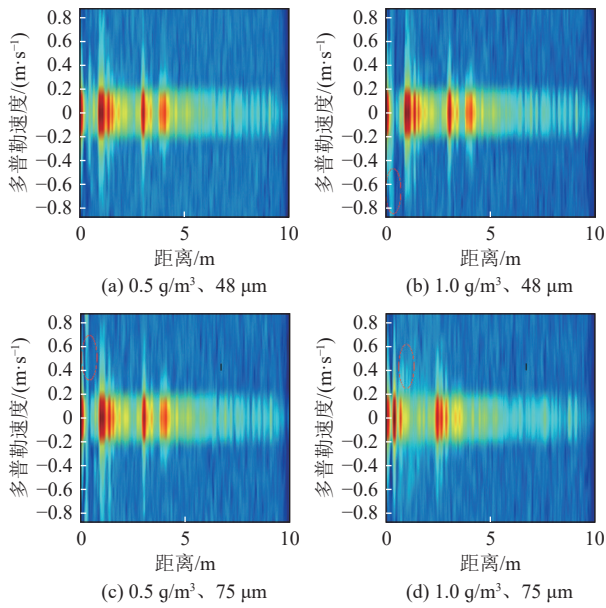


图 7 不同粉尘质量浓度和粒径下的动态采集信号数据
Fig.7 Signal data collected dynamically at different mass concentrations and particle sizes of dust

速度。由检测结果可知,动态条件下,随着粉尘浓度越大,毫米波雷达信号受粉尘影响越明显,但并不影响目标检测。

综合分析得出,在 $0.5\sim 1.0\text{ g/m}^3$ 的粉尘质量浓度内,静态与动态粉尘状态下的目标检测不受影响,因此毫米波雷达可以适应于煤矿井下的粉尘环境。

4.2.2 水雾环境

采集不同水雾环境下的毫米波雷达信号图像,在温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下,通过压力泵将水通过喷头喷洒入实验平台。调节喷头孔径来改变水雾的形状与粒径大小,改变喷头的数量与分布情况来实现水雾的喷洒面积与喷洒区域。实验共采集 4 组不同水雾环境下的毫米波雷达信号图像,分别为不同粒径下的不同喷洒面积水雾环境,同一水压下不同状态以及混合环境。图 8 为无水雾状态下采集的信号,不同水雾环境下的毫米波雷达信号数据如图 9、图 10 所示。

由图 9 可知,在粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 水雾环境下,随着水雾喷洒面积增加,毫米波雷达的信号无明显变化。在喷洒面积为 1.6 m^2 时,有一定的影响但信号变化可以忽略,粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 水雾喷洒面积的变化对毫米波雷达信号的影响并不显著。在粒径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 水雾环境下,随着水雾喷洒面积增加,在喷洒面积为 1.6 m^2 时,有一定的影响但信号变化可以忽略,粒径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 水雾喷洒面积的变化对毫米波雷达信号的影响并不显著。

由图 10 可知,水滴、水柱对毫米波雷达信号有明显影响,水柱较水滴影响更大,混合不同距离的水滴、水柱,毫米波雷达信号有明显的特征变化。

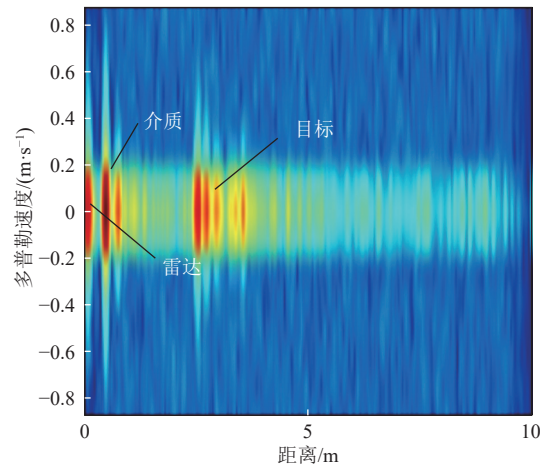


图 8 无水雾状态下采集的信号数据
Fig.8 Signal data collected at water mist free state

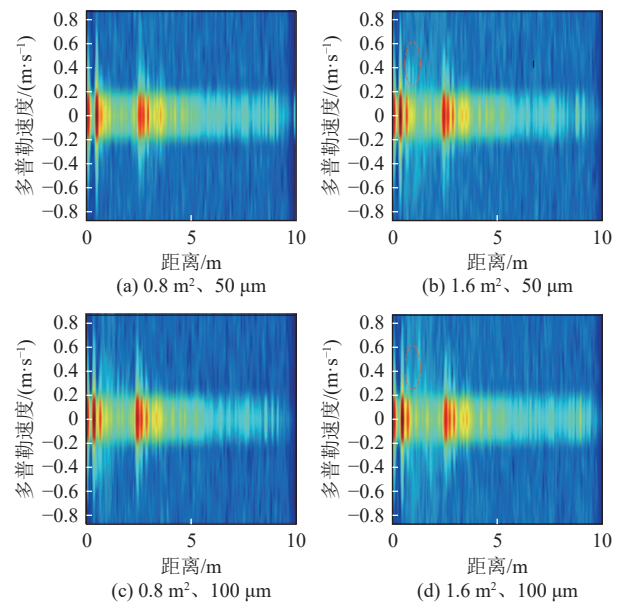


图 9 不同粒径水雾环境不同喷洒面积信号数据
Fig.9 Signal data of different spray areas in water mist environments with different particle sizes

通过不同水雾环境下的毫米波雷达信号多普勒热力图可以看出,在水雾喷洒面积增加的情况下, $50\text{ }\mu\text{m}$ 的水雾对毫米波雷达信号几乎没有影响, $100\text{ }\mu\text{m}$ 的水雾对毫米波雷达信号有影响但不明显;不同的断续水滴与连续水柱对毫米波雷达信号有影响,毫米波雷达可以检测到断续水滴与连续水柱的距离与流动速度信息。但在所选的水雾及混合实验条件下,目标信号不受水雾、水滴及水柱影响,故毫米波雷达可以满足煤矿巷道水雾环境下的巷道检测与点云重建。

4.2.3 巷道围岩结构

毫米波雷达波段选择 $77\sim 81\text{ GHz}$,对毫米波雷达信号在巷道中的衰减进行 Matlab 仿真,得到毫米波雷达信号随传播距离衰减变化结果,如图 11 所示,可以看出,

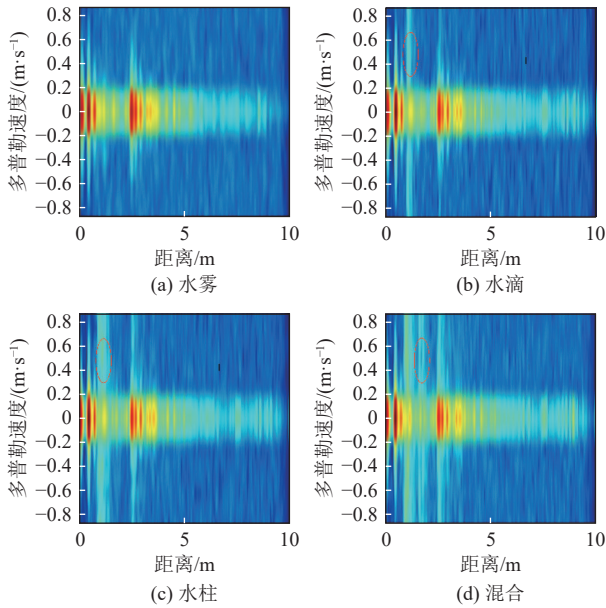


图 10 水滴、水柱及混合水雾状态下的信号数据
Fig.10 Signal data in water drop, column and mixed water mist states

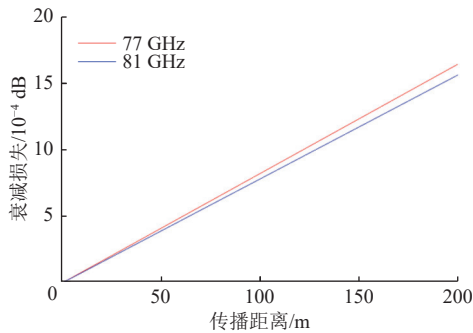


图 11 毫米波信号随传播距离衰减变化
Fig.11 Attenuation variation of millimetre-wave signal with propagation distance

毫米波雷达信号衰减损失随着距离增加而线性增加,整体衰减较小;随着毫米波雷达信号频率的增加,衰减降低但波动较小。

4.3 毫米波点云巷道空间重建分析

考虑到毫米波雷达阵列采集的系统误差,通过数据处理计算巷道的宽度与高度信息作为测量误差的指标是相对合理的。截取固定长度的巷道数据,在该范围内求取宽度与高度的平均值与实际的巷道尺寸比较。毫米波雷达采集点云效果如图 12a 所示,巷道点云重建效果如图 12b 所示。表 3 为巷道实际测量结果,整体巷道误差结果如图 13 所示。

通过实验测试与模拟巷道环境验证,基于点云泊松表面重建方法,巷道重建误差结果计算巷道整体宽度的平均绝对误差为 1.86 cm、平均绝对误差百分比为 0.59%,巷道整体高度的平均绝对误差为 2.04 cm,平均绝对误差百分比为 0.78%。

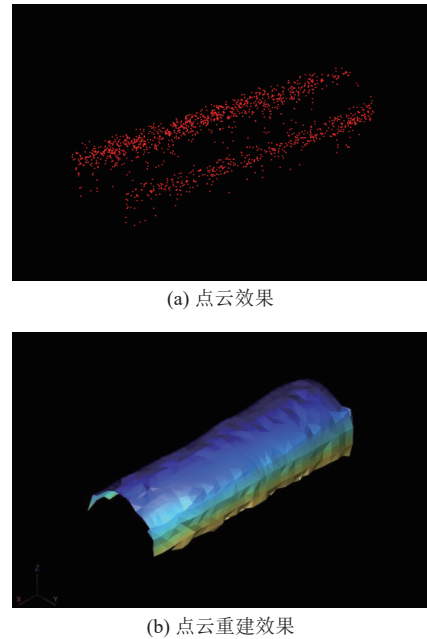


图 12 巷道点云和点云重建效果
Fig.12 Effect of point cloud and point cloud reconstruction of roadway

表 3 巷道测量数据结果
Table 3 Survey data results of roadway

组号	测量值/m		绝对误差/m		误差百分比/%	
	宽度	高度	宽度	高度	宽度	高度
1	3.155	2.560	0.005	0.040	0.159	1.538
2	3.181	2.588	0.031	0.012	0.984	0.462
3	3.138	2.596	0.012	0.004	0.381	0.154
4	3.135	2.627	0.015	0.027	0.476	1.038
5	3.115	2.607	0.035	0.007	1.111	0.269
6	3.147	2.595	0.003	0.005	0.095	0.192
7	3.177	2.585	0.027	0.015	0.857	0.577
8	3.162	2.637	0.012	0.037	0.381	1.423
9	3.130	2.653	0.020	0.053	0.635	2.038
10	3.176	2.604	0.026	0.004	0.825	0.154

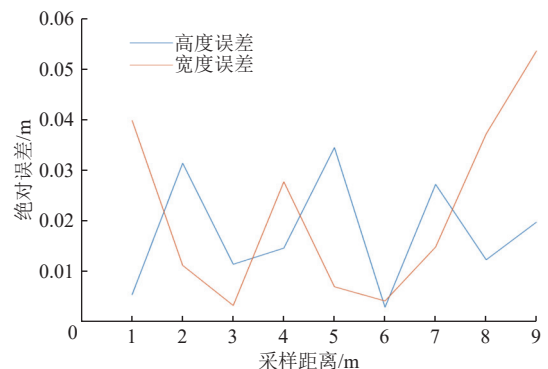


图 13 巷道点云重建与实际测量误差对比
Fig.13 Comparison of reconstructed and measured errors of roadway point cloud

5 结论

(1) 煤矿巷道空间毫米波雷达测量特性与重建方法研究, 通过深入研究复杂环境下毫米波雷达的空间感知与测量理论, 构建复杂环境实验平台, 为复杂环境下的毫米波雷达空间环境模拟、感知性能分析和三维空间重建等方面取得了突破, 为毫米波雷达在煤矿复杂环境下的应用奠定了坚实基础。

(2) 研究了粉尘和水雾环境对毫米波雷达性能的影响机理。通过静、动态实验, 静态粒径与浓度变化对雷达信号均无明显变化, 动态粉尘 75、48 μm 粒径下, 但随着粉尘浓度越大, 信号变化越明显; 在不同浓度、粒径水雾下, 雷达信号无明显变化, 水滴与水柱对雷达信号有影响, 但并不影响巷道等目标重建。实验表明了毫米波雷达可以在煤矿巷道粉尘、水雾条件下实现有效测量。

(3) 提出了巷道空间毫米波雷达点云泊松表面重建方法, 适用于稀疏毫米波点云巷道表面重建, 实现了精准的毫米波点云巷道三维重构, 宽度和高度的测量平均绝对误差百分比分别为 0.59% 和 0.78%, 为煤矿巷道数字化建模提供了可靠的空间信息支撑。

(4) 研究基于毫米波雷达的煤矿巷道空间感知与重建方法, 为煤矿巷道感知、数字重构提供新思路、新方法, 为煤矿智能开采、人员与设备的安全保障等提供数据支撑, 对提升煤矿装备作业的高效性、安全性和可靠性, 具有重要的学术研究意义。但单毫米波雷达点云具有一定的稀疏性, 需进一步探究毫米波雷达阵列、深度学习与多传感器融合的增强环境感知技术, 提高巷道重建精度与完整度。

符号注释:

a 为巷道宽度, m; A 为信号传播截面积, m^2 ; b 为巷道高度, m; c 为真空中的光速, 2.997×10^8 m/s; d 为粒子尺度, μm ; D 为深度值; f 为频率, Hz; f_{IF} 为中频信号, Hz; Δf_{IF} 为中频移位, Hz; f_m 为原始中频信号, Hz; f_0 为啁啾起始频率, Hz; F_0 为节点函数; ΔH 为巷道围岩的平均高度, m; k_0 为在自由空间下电磁波信号的波数; k_x 、 k_y 为 x 、 y 方向上的传递常数; Δl 为距离测量误差, m; L 为传播距离, m; m 为巷道宽度的模式阶数; n 为巷道高度的模式阶数; o 为节点; p_t 为发射功率, W; p_r 为接收功率, W; q 为点集中的点; Q 为粗糙系数; R 为半径, m; s 为输入点集 S_p 的每一个点数据; S 为损耗参数; t 为时间延迟, s; t_s 为扫描时间, s; $V(q)$ 为向量场; W_B 为频率跨度, Hz; α 为总衰减, dB/m; α_a 为吸收衰减, dB/m; α_s 为散射衰减, dB/m; σ_s 为散射截面积, m^2 ; β 为波数, rad/m; λ 为波长,

mm; η 为介电损失因子; δ^2 为方差; θ 为入射角, ($^\circ$); $\text{Ngb}_{\text{rD}}(s)$ 为 $s.p$ 8 个邻近节点; $\{\alpha_{o,s}\}$ 为权重; χ 为指示函数; ε 为介电常数; $s \cdot \vec{N}$ 代表样本点对应的法向量; $\Delta \tau_i(f_0)$ 为代入啁啾起始频率后的延迟时间, s; ∇ 为拉普拉斯算子。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 王国法, 任怀伟, 马宏伟, 等. 煤矿智能化基础理论体系研究[J]. 智能矿山, 2023, 4(2): 2-8.
WANG Guofa, REN Huaiwei, MA Hongwei, et al. Research on basic theoretical system of coal mine intelligentization[J]. Journal of Intelligent Mine, 2023, 4(2): 2-8.
- [2] 王国法, 张良, 李首滨, 等. 煤矿无人化智能开采系统理论与技术研发进展[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 34-53.
WANG Guofa, ZHANG Liang, LI Shoubin, et al. Progresses in theory and technological development of unmanned smart mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 34-53.
- [3] 董书宁. 煤矿安全高效生产地质保障的新技术新装备[J]. 中国煤炭, 2020, 46(9): 15-23.
DONG Shuning. New technology and equipment of geological guarantee for safe and efficient production in coal mine[J]. China Coal, 2020, 46(9): 15-23.
- [4] 王海军, 刘再斌, 雷晓荣, 等. 煤矿巷道三维激光扫描关键技术及工程实践[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 109-117.
WANG Haijun, LIU Zaibin, LEI Xiaorong, et al. Key technologies and engineering practice of 3D laser scanning in coal mine roadways[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(1): 109-117.
- [5] 菅洁, 谢建林, 郭勇义. 煤矿井下粉尘浓度与粉尘粒度测定分析[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(4): 592-597.
JIAN Jie, XIE Jianlin, GUO Yongyi. Analysis of coal mine dust concentration and particle size[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(4): 592-597.
- [6] 梁运涛, 田富超, 冯文彬, 等. 我国煤矿气体检测技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1701-1714.
LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, FENG Wenbin, et al. Research progress of coal mine gas detection technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1701-1714.
- [7] 胡兴涛, 朱涛, 苏继敏, 等. 煤矿巷道智能化掘进感知关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2123-2135.
HU Xingtao, ZHU Tao, SU Jimin, et al. Key technology of intelligent drifage perception in coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2123-2135.
- [8] 陈先中, 刘荣杰, 张森, 等. 煤矿地下毫米波雷达点云成像与环境地图导航研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2182-2192.
CHEN Xianzhong, LIU Rongjie, ZHANG Sen, et al. Development of millimeter wave radar imaging and SLAM in underground coal mine environment[J]. Journal of China Coal Society,

- 2020, 45(6): 2182–2192.
- [9] 蒋俊林, 陈昶昊, 姚志强, 等. 烟雾环境下单通道毫米波雷达建图算法研究[C]//2022 中国自动化大会论文集. 厦门, 2022: 153–158.
- [10] 詹军, 董学才, 洪峰, 等. 智能汽车传感器实时功能模型及验证[J]. 汽车工程, 2019, 41(7): 731–737.
ZHAN Jun, DONG Xuecai, HONG Feng, et al. Real-time functional model and verification of intelligent vehicle sensors[J]. *Automotive Engineering*, 2019, 41(7): 731–737.
- [11] ZANG Shizhe, DING Ming, SMITH D, et al. The impact of adverse weather conditions on autonomous vehicles: How rain, snow, fog, and hail affect the performance of a self-driving car[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(2): 103–111.
- [12] ROUVEURE R, FAURE P, MONOD M O. Description and experimental results of a panoramic K-band radar dedicated to perception in mobile robotics applications[J]. *Journal of Field Robotics*, 2018, 35(5): 678–704.
- [13] ADAMS M, JOSE E. Millimeter wave RADAR power-range spectra interpretation for multiple feature detection[M]//Autonomous mobile robots. Boca Raton: CRC Press, 2018: 41–98.
- [14] CHENG Ruichang, LIANG Xingdong, ZHANG Fubo, et al. Multipath scattering of typical structures in urban areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(1): 342–351.
- [15] CHENG Ruichang, LIANG Xingdong, ZHANG Fubo, et al. Multiple-bounce modeling of high-rise buildings with airborne tomography array[C]//2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama). Toyama, Japan. IEEE, 2018: 791–796.
- [16] LI Xiaowan, ZHANG Fubo, LIANG Xingdong, et al. Fourfold bounce scattering-based reconstruction of building backs using airborne array TomoSAR point clouds[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1937.
- [17] 吴旭, 卢凌雯, 梁栋栋, 等. 基于点云数据的曲面重建算法比较研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2019, 42(1): 46–50.
WU Xu, LU Lingwen, LIANG Dongdong, et al. Comparison of surface reconstruction algorithms based on point cloud data[J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2019, 42(1): 46–50.
- [18] 石育, 王斌, 陈超, 等. 基于视觉 SLAM 的可交互虚拟车间构建方法[J]. 机械设计, 2022, 39(5): 1–9.
SHI Yu, WANG Bin, CHEN Chao, et al. Research on construction method of the interactive virtual workshop based on visual SLAM[J]. *Journal of Machine Design*, 2022, 39(5): 1–9.
- [19] FORSYTH D. Computer vision: A modern approach[J]. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002, 14(1): 294–299.
- [20] KAZHDAN M, HOPPE H. Screened Poisson surface reconstruction[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(3): 1–13.
- [21] 佟卓键, 桂进斌, 胡磊, 等. 用于全息三维显示的数据获取方法进展[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(10): 101–111.
TONG Zhuojian, GUI Jinbin, HU Lei, et al. Progress on data acquisition methods for holographic 3D display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(10): 101–111.
- [22] 陈玉涛. 煤矿胶带运输巷道综合降尘技术[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(4): 796–804.
CHEN Yutao. Comprehensive dust reduction technology of coal mine belt transport tunnel[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2024, 44(4): 796–804.
- [23] 秦波涛, 周刚, 周群, 等. 煤矿综采工作面活性磁化水喷雾降尘技术体系与应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3891–3901.
QIN Botao, ZHOU Gang, ZHOU Qun, et al. Dust removal system and application of the surfactant-magnetized water spray in the fully mechanized mining face of coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 3891–3901.
- [24] 于晴, 侯庆文, 陈先中. 高炉浓尘环境料面散射特性建模与成像[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(5): 1277–1285.
YU Qing, HOU Qingwen, CHEN Xianzhong. Scattering characteristics modeling and imaging of blast furnace burden surface in dusty environment[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(5): 1277–1285.
- [25] 易超, 张清河, 刘广旭, 等. 基于卷积神经网络的色散介质电磁参数重构[J]. 微波学报, 2021, 37(2): 70–75.
YI Chao, ZHANG Qinghe, LIU Guangxu, et al. Reconstruction of electromagnetic parameters of dispersive media based on convolutional neural network[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(2): 70–75.
- [26] 邹梦凡, 何晓雨. 自动驾驶雷达频段降雨环境散射特性建模分析[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(10): 2161–2169.
ZOU Mengfan, HE Xiaoyu. Modeling and analysis on scattering characteristics automatic driving radar bands in rainy environment[J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(10): 2161–2169.
- [27] 郭婧, 张合, 赵学健. 降雨对激光定距系统后向散射特性的影响[J]. 光子学报, 2014, 43(11): 90–94.
GUO Jing, ZHANG He, ZHAO Xuejian. Study on backscattering characteristics of laser ranging system in the rain[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 90–94.
- [28] 姚善化. 复杂矿井巷道中电磁波传播特性及相关技术研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2010.
YAO Shanhua. Study on characteristic of electromagnetic waves propagation and key technology in complicated coal mine tunnels[D]. Hefei: Anhui University, 2010.
- [29] 王可欣, 金映含, 张东亮. 基于深度相机的虚拟眼镜试戴[J]. 图学学报, 2023, 44(5): 988–996.
WANG Kexin, JIN Yinghan, ZHANG Dongliang. Virtual glasses try-on using a depth camera[J]. *Journal of Graphics*, 2023, 44(5): 988–996.
- [30] 鲁猛胜, 姚剑, 董赛云. 法向约束的点云数据泊松表面重建算法[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(4): 51–55.
LU Mengsheng, YAO Jian, DONG Saiyun. The Poisson surface reconstruction algorithm for normal constraint's for point cloud data[J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(4): 51–55.

(责任编辑 郭东琼)