



文章编号: 1671-251X(2025)02-0034-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18228

煤矿井下重点场所 5G 覆盖性能研究及验证

索智文¹, 王亚坤^{2,3,4}

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司 智能技术中心, 陕西 榆林 719315; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013; 3. 煤炭行业煤矿应急救援及矿井通信工程研究中心, 北京 100013; 4. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)

摘要: 当前矿用 5G 专网相关研究主要面向系统架构和上层应用, 结合井下实际环境对矿用 5G 底层技术特性的研究成果较少。为进一步推动矿用 5G 技术的高适配性发展和高可靠性应用, 从矿用 5G 覆盖性能影响因素、煤矿重点场所矿用 5G 传输性能及现场测试 3 个方面展开研究。理论分析了 5G 工作频段、工作面或巷道截面积、巷道壁粗糙度等与矿用 5G 覆盖性能的关系, 结果表明: 工作频段越低、工作面或巷道截面积越大、巷道壁粗糙度越小、遮挡因素越少, 则矿用 5G 覆盖性能越好。梳理了煤矿井下主运巷道、辅运巷道、综采工作面和掘进工作面的工作条件 and 环境因素等, 得出结论: 辅运巷道截面较大、粗糙度较低、遮挡相对少, 5G 覆盖性能最优; 为改进上述场所中 5G 覆盖性能, 宜采用低频段信号进行 5G 传输与覆盖。在 4 个煤矿的不同工作场所, 采用 900 MHz 频段测试矿用 5G 传输性能, 结果表明: 辅运巷道极限覆盖距离超过 700 m, 主运巷道极限覆盖距离达 450 m, 综采工作面部署 2 个基站可实现稳定覆盖且上行传输速率保持在 90 Mbit/s 以上, 掘进工作面距 5G 基站 150 m 处上行传输速率达 68.2 Mbit/s。测试结果与理论分析一致, 验证了矿用 5G 可有效满足不同工作场所的应用需求。

关键词: 矿用 5G; 覆盖性能; 主运巷道; 辅运巷道; 综采工作面; 掘进工作面
中图分类号: TD655 文献标志码: A

Research and verification of 5G coverage performance in key areas of underground coal mines

SUO Zhiwen¹, WANG Yakun^{2,3,4}

(1. Intelligent Technology Center, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin 719315, China; 2. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Engineering Research Center for Technology Equipment of Emergency Refuge in Coal Mine, Beijing 100013, China; 4. Beijing Engineering and Research Center of Mine Safe, Beijing 100013, China)

Abstract: Current research on mining 5G networks mainly focuses on system architecture and upper-layer applications, while studies on the underlying technical characteristics of mining 5G in underground environments remain limited. To further advance the development of highly adaptable and reliable mining 5G technology, this study investigated three aspects: factors influencing mining 5G coverage performance, transmission performance in key coal mine areas, and field testing. Theoretical analysis was conducted to explore the relationships between mining 5G coverage performance and factors such as the 5G operating frequency band, the cross-sectional area of working faces or roadways, and the roughness of roadway walls. The results showed that lower operating

收稿日期: 2024-10-10; 修回日期: 2025-01-15; 责任编辑: 李明。

基金项目: 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项重点项目(2024-TD-ZD015-03, 2024-TD-ZD015-01); 2024 年工业互联网创新发展工程-工业 5G 轻量化融合终端项目(TC240AAKM)。

作者简介: 索智文(1980—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 高级工程师, 主要从事煤矿智能化建设相关工作, E-mail: 10028574@shenhua.cc。通信作者: 王亚坤(1996—), 男, 河南周口人, 工程师, 主要从事智能矿山通信技术研发工作, E-mail: wangyakun@ccrise.cn。

引用格式: 索智文, 王亚坤. 煤矿井下重点场所 5G 覆盖性能研究及验证[J]. 工矿自动化, 2025, 51(2): 34-40.

SUO Zhiwen, WANG Yakun. Research and verification of 5G coverage performance in key areas of underground coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(2): 34-40.



扫码移动阅读

frequency bands, larger cross-sectional areas of the working faces or roadways, smaller roughness of roadway walls, and fewer obstructions all contributed to improved mining 5G coverage performance. The working conditions and environmental factors of key areas in underground coal mines, including main transport roadways, auxiliary transport roadways, fully mechanized mining faces, and excavation faces, were analyzed. It was concluded that auxiliary transport roadways, with larger cross-sectional areas, lower roughness, and relatively fewer obstructions, exhibited the optimal 5G coverage performance. To improve 5G coverage performance in these areas, the use of low-frequency signals was recommended for 5G transmission and coverage. In the working areas of four coal mines, the transmission performance of mining 5G was tested at the 900 MHz frequency band. The results showed that the maximum coverage distance exceeded 700 meters in auxiliary transport roadways and reached 450 meters in main transport roadways. In the fully mechanized mining face, two base stations achieved stable coverage, and the uplink transmission rate consistently exceeded 90 Mbit/s. In the excavation working face, the uplink transmission rate reached 68.2 Mbit/s at a distance of 150 meters from the 5G base station. The test results align with the theoretical analysis, verifying that mining 5G can effectively meet the application needs of different working areas.

Key words: mining 5G; coverage performance; main transport roadway; auxiliary transport roadway; fully mechanized mining face; excavation working face

0 引言

煤炭行业尤其是井工煤矿由于工作环境的特殊性,面临着危险高、事故多、从业人员断层严重等问题,因此,以少人化、无人化为特色的新型智能化生产方式成为当今煤矿发展的重要着力点^[1-2]。在该过程中,新一代 5G 移动通信技术凭借其大带宽、低时延、高可靠等优势,成为矿山智能化技术演进过程中的重要支撑,得到了众多学者、科研单位和高校的研究^[3-4]。在标准制定方面:中国矿业大学(北京)从能源行业的角度牵头研究制定了煤矿用 5G 通信系统标准,涵盖功能特性、技术要求、试验方法等^[5];中国通信标准化协会从通信行业的角度制定了 5G 矿山行业专网通信标准体系,为矿用 5G 专网系列标准的制定明确了工作规划^[6]。在系统架构方面:王国法等^[7]研究了智慧矿山系统架构,探讨了现行标准对矿用 5G 基站性能的约束,并对应给出了提升发射功率阈值的方案;郝俊信^[8]研究了矿用 5G 装备远程控制技术,构建了感知技术和控制技术融合的 5G 智能综采远控系统。在技术特性方面:孙继平^[9]研究了矿用 5G 网络切片技术,针对矿用综合承载网技术要求,提出了适配的网络切片划分方案;李晨鑫^[10]研究了矿用无线覆盖增强关键技术,提出了基于多载波补充上行链路的传输速率提升方案和基于可重构智能超表面的覆盖距离增强方案。在技术应用方面:李晨鑫等^[11]研究了基于 5G 直连通信的矿井应急通信技术,提出了基于设备标志的直连通信时频资源映射方案;侯刚等^[12]研究了煤矿井下自动驾驶系统,提出了基于多传感器融合感知的车辆路径规划和智

能调度方案。在装备与系统研发方面:康守信^[13]研究了矿用应急通信基站,提出了天线发射功率分配机制及本安化设计方案;柴尚东^[14]研究了带式输送机巡检系统,依托 5G 低时延大带宽传输能力实现了视频图像采集和智能分析。

当前矿用 5G 专网相关研究众多,但主要面向系统架构和上层应用,结合井下实际环境对矿用 5G 底层技术特性的研究成果相对较少。为实现矿用 5G 技术的高适配性发展和高可靠性应用,需重点研究井下矿用 5G 信号的基本传输特性。本文系统梳理了井下矿用 5G 覆盖性能的影响因素,对比分析了井工煤矿重点场所的矿用 5G 传输性能,结合现场测试进一步验证了理论分析结果,为后续矿用 5G 大规模应用落地提供了参考。

1 矿用 5G 覆盖性能影响因素

通信信号作为信息的载体,以电磁波形式在空间传播,在该过程中因波速扩散效应会存在一定的能量损失^[15]。此外,非理想条件下散射和折射等会进一步导致能量损耗,且具有较大的随机性,进而影响通信信号的覆盖范围。相比于地面和露天煤矿等较为空旷的环境,井工煤矿存在空间受限、大型金属设备多等特点,导致井下矿用 5G 信号的覆盖性能进一步恶化^[16],需针对井工煤矿的环境特点和影响因素对矿用 5G 的覆盖性能进行差异化分析。

1.1 工作频段

频谱作为无线通信的基础,所使用的工作频段会直接影响通信性能。自由空间的路径损耗为

$$L = 32.4 + 20\lg \frac{F}{\text{MHz}} + 20\lg \frac{D}{\text{km}} \quad (1)$$

式中： F 为信号频率； D 为信号传输距离。

从式(1)可看出，信号的路径损耗与传输距离、频段大小呈正比，同等条件下高频信号的路径损耗大于低频信号。

除自由空间的路径损耗之外，还需要综合考虑非理想条件下的影响因素。一方面，高频信号在经过障碍物时绕射能力较差，较低频信号的损耗更大；另一方面，需考虑空气中多种介质(如粉尘、水蒸气等)吸收电磁波导致的额外损耗，高频信号较低频信号更易受到空间中介质的影响，信号衰减更大。

井工煤矿中信号传输的基本特性与其他环境中基本一致，且相对恶劣的环境导致高频信号的衰减程度更大。综合分析可知，在煤矿环境下，工作频段越低，信号衰减越小，矿用 5G 的覆盖能力越强。

1.2 截面面积

文献[17]研究表明，信号衰减常数与巷道宽度/高度及巷道壁的材质有关，信号强度最低次水平极化 α_{Eh} 和垂直极化 α_{Ev} 分别为

$$\alpha_{Eh} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{\epsilon_1}{a^3 \sqrt{\epsilon_1 - 1}} + \frac{1}{b^3 \sqrt{\epsilon_2 - 1}} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_{Ev} = 4.343\lambda^2 \left(\frac{1}{a^3 \sqrt{\epsilon_1 - 1}} + \frac{\epsilon_2}{b^3 \sqrt{\epsilon_2 - 1}} \right) \quad (3)$$

式中： λ 为电磁波波长； ϵ_1, ϵ_2 分别为巷道壁和顶底板的相对介电常数； a 为巷道宽度； b 为巷道高度。

针对巷道截面变化，在 900 MHz 频段对信号衰减情况进行仿真，结果如图 1 所示。可看出在巷道宽度不变的情况下，信号强度衰减率随巷道高度的增大而减小；在巷道高度不变的情况下，信号强度衰减率随巷道宽度的增大而减小。由此可得，工作面或巷道截面面积越大，矿用 5G 的覆盖性能越好。

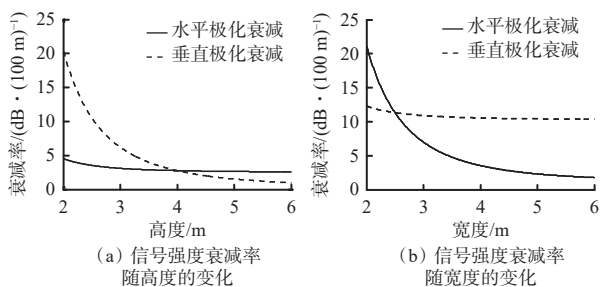


图 1 工作面或巷道截面面积与信号强度衰减率的关系

Fig. 1 The relationship between cross-section area of working face or roadway and signal decay rate

1.3 粗糙度

电磁波在狭窄的巷道内传输时，会在巷道壁之间反复反射，巷道壁的粗糙程度会直接影响信号入射角和发射角之间的对应关系，从而影响信号的能量损耗。另一方面，不同粗糙程度的巷道壁对于信

号极化特性的改变程度不同。学者类比光线传播特性对电磁波在巷道壁的反射进行了研究，得出多次折射后的综合损耗因子 l 和衰减因数 α ^[18]：

$$l = \exp\left(-\pi^2 \lambda \left(\frac{h_1^2}{a^4} + \frac{h_2^2}{b^4}\right)\right) \quad (4)$$

$$\alpha = -10 \lg l = 4.343 \pi^2 \lambda \left(\frac{h_1^2}{a^4} + \frac{h_2^2}{b^4}\right) \quad (5)$$

式中 h_1, h_2 分别为巷道壁和顶底板的粗糙度均方根。

基于覆盖能力较强的 900 MHz 频段对衰减因子进行仿真。仿真中设置巷道宽度为 5 m，对巷道高度 2~6 m 及粗糙度均方根 0~0.2 进行遍历，结果如图 2 所示。可看出信号强度衰减率随着粗糙度的增大而增大。因此，巷道壁的粗糙度越小，则矿用 5G 的覆盖性能越好。此外，仿真结果也可证明信号强度衰减率随着巷道截面面积的增大而减小。

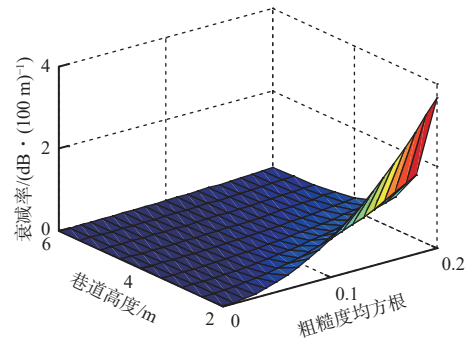


图 2 巷道壁粗糙度和信号强度衰减率的对应关系

Fig. 2 The relationship between roughness of roadway and signal decay rate

1.4 遮挡因素

考虑到收发两端的位置及传播路径上的遮挡物，信号的传播方式可分为以下 3 种。

1) 完全视距传输。收发两端之间不存在任何遮挡物，电磁波以直线传播方式到达接收端。该方式下信号能量损失最小，可达到的覆盖距离最大。

2) 近视距传输。收发两端之间存在不完全阻挡信号传输的障碍物(如树木)，信号可通过衍射和透射等方式到达接收端，但存在一定程度的能量损耗。鉴于井下环境的复杂性，近视距传输暂不考虑。

3) 非视距传输。收发两端之间存在完全阻挡信号传输的障碍物(如楼宇、大型机械设备等)，信号可通过反射和折射等方式到达接收端，但接收端接收到的信号能量较小。

国际通信标准化组织 3GPP(3rd Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划)暂未针对煤矿特殊场景进行信道建模。考虑到煤矿的主要特点为封闭空间且存在大量机械设备，可借鉴 3GPP 已

定义的室内工厂场景进行类比分析。在设备较密的情况下,视距传输路径损耗 L_{LOS} 和非视距传输路径损耗 L_{NLOS} 分别为^[19]

$$L_{\text{LOS}} = 31.84 + 21.50 \lg \frac{d_{3\text{D}}}{\text{m}} + 19.00 \lg \frac{f_c}{\text{GHz}} \quad (6)$$

$$L_{\text{NLOS}} = \max(L, L_{\text{LOS}}) \quad (7)$$

式中: $d_{3\text{D}}$ 为发送设备和接收设备之间的3D距离; f_c 为中心频率。

室内工厂场景下 L 的计算公式为

$$L = 33.63 + 21.9 \lg \frac{d_{3\text{D}}}{\text{m}} + 20 \lg \frac{f_c}{\text{GHz}} \quad (8)$$

同等条件下,非视距传输的路径损耗大于视距传输的路径损耗。针对煤矿井下遮挡因素较多的情况,非视距传输的概率更大,信号的衰减程度更严重,导致信号的覆盖距离进一步减小。

2 煤矿重点场所矿用5G传输性能

井工煤矿基于工作目的和作业方式划分了不同的工作场所,包括主运巷道、辅运巷道、综采工作面、掘进工作面等。鉴于不同场所的生产装备和环境条件差异较大,矿用5G的传输性能会存在一定差异。为制定合理的矿用5G设备部署策略,需要结合矿用5G覆盖性能的多重影响因素,定性分析不同工作场所的矿用5G传输性能。

2.1 辅运巷道

辅运巷道是井下运输设备和人员的重要通道,主要车辆类型包括无轨胶轮车、柴油机胶轮车、齿轨机车等^[20]。借助矿用5G移动通信技术可以分阶段实现辅运车辆的自动驾驶,包括辅助驾驶、远程自动驾驶和协同式自动驾驶。一方面,车辆需要将视频摄像头、激光雷达、毫米波雷达等设备感知的环境信息及车辆自身运行状态信息通过蜂窝网络上行链路上传到远程控制平台或远程驾驶座舱等,从而系统性地掌握车辆自动驾驶所需的必要环境信息;另一方面,可以通过蜂窝网络下行链路下发高清地图信息及车辆远程操控指令等。此外,对于协作式自动驾驶,还可支持危险情况下的远程临时接管。

辅运巷道的高度和宽度常规可达5m左右,长度可达数十千米,截面相比主运巷道有一定的提升。此外,辅运巷道可通过喷浆方式保持巷道壁平整,不存在较大浓度的粉尘和水汽等吸收电磁波的介质。同时,辅运巷道不会长时间存在大型机械设备,遮挡因素几乎可以忽略,相对空旷的环境有利于通信信号的传输。因此,辅运巷道的矿用5G传输性能较优。

2.2 主运巷道

主运巷道作为煤炭运输的主要通道,是煤矿生产重要的“动脉”,主要通过带式输送机将开采后的煤炭运送到处理区或中转站等,其工作效率直接影响煤炭产量^[20]。在主运巷道实现矿用5G信号覆盖,一方面可以通过蜂窝网络下行链路实现对带式输送机运行状态的远程控制,包括启停、紧急制动、运行速度及倾斜角度调整等;另一方面,可以通过蜂窝网络上行链路实现对带式输送机的远程监控。矿用监控设备可以将视频流信息汇聚到矿用数据终端或矿用5G模组,通过矿用5G专网传输到远程控制中心,进而对设备运行情况进行远程监控及危险监测警告,如带式输送机超速、跑煤、堆煤等。

主运巷道的宽度和高度一般为2.5m,截面相对较小,信号传输过程中会存在较多的多径干扰,不利于信号传输。从粗糙度的角度,主运巷道的巷道壁平整度一般,且在煤炭运输过程中由于带式输送机、水泵等存在较多的遮挡因素,所以主运巷道的环境不利于矿用5G信号传输,宜采用低频段5G信号进行传输与覆盖,以降低矿用5G基站的部署密度。

2.3 综采工作面

综采工作面目前主要采用综合机械化设备进行煤炭开采,涵盖削煤、落煤、装煤、支护等多个流程的工作,是煤炭开采环节中重要的一环,也是煤矿智能化应用的关键区域^[21]。在综采工作面实现矿用5G网络覆盖既减轻了恶劣条件下人员的参与度,同时也可提升煤炭开采效率。一方面,通过矿用5G远程控制可以实现井下设备操作人员由装备列车到地面的转移,实现煤矿少人则安、无人则安。另一方面,通过蜂窝网络上行链路实现环境监控数据、设备运行参数及必要工作人员健康监测数据的上传,从而实现数据融合分析和危险情况实时预警等。

综采工作面的长度一般在150~300m,采煤会造成煤壁的粗糙度相对较大,不利于信号折射。此外,在综采工作面存在采煤机、支架等大型机械化设备,对信号传输的遮挡较严重,存在大量的非视距传输。同时喷淋降尘会导致综采工作面的湿度较大,水汽对于电磁波尤其是高频段电磁波的吸收能力较强,也会导致通信信号衰减。综合分析,综采工作面的环境条件不利于矿用5G网络长距离覆盖,宜采用1GHz以下低频段进行5G信号传输与覆盖,以降低矿用5G基站的部署密度。

2.4 掘进工作面

掘进作为综采的前提,通过掘进机或掘锚一体机等设备打通连接到地下煤层的巷道,涉及掘进、割

煤、出矸等工序。由于地质条件的不确定性,一般掘进工作面的工作环境较综采工作面更恶劣,不确定因素更复杂,所以对依托于矿用 5G 专网的智能化应用的需求更高。一方面,可以通过矿用 5G 专网实现对掘进设备的远程控制,从而降低恶劣工作环境下人员的参与度,实现无人化掘进、运输、支护等;另一方面,除了设备运行相关的工况数据之外,还可将“三气体”(一氧化碳、甲烷、氧气)浓度、温度等环境监测数据同步上传到集控中心,从而进行超阈值告警等。

掘进工作面的高度和宽度一般在 5 m 之内,截面较小,且存在煤层、岩层等多种地质结构,对通信信号的传输产生不利影响。在狭小的空间内存在掘进机、支护设备等通信信号传输的遮挡因素。此外,掘进工作面的防尘措施,如湿法除尘、喷雾降尘等,会造成高湿度的环境,通信信号的衰减率将会大大增加。因此,理论分析认为掘进工作面的矿用 5G 覆盖性能不及辅运巷道,宜采用低频段 5G 信号进行传输与覆盖,以降低矿用 5G 基站的部署密度。

煤矿重点场所矿用 5G 覆盖性能影响因素对比见表 1。

表 1 煤矿重点场所矿用 5G 覆盖性能影响因素对比
Table 1 Comparison of factors influencing 5G coverage performance in key coal mine areas

场所	典型大小	设备类型	巷道粗糙度	其他因素
主运巷道	宽度和高度一般为 2.5 m	带式输送机、水泵等	平整度一般	—
辅运巷道	宽度和高度一般为 5 m, 长度最大可达数十千米	不同类型的车辆	较为平整	—
综采工作面	长度一般在 150~300 m	采煤机、支护设备等	较为粗糙	粉尘、水汽
掘进工作面	高度和宽度一般在 5 m 之内	掘进机、支护设备等	较为粗糙	粉尘、水汽

3 现场测试

为充分验证矿用 5G 覆盖性能,选取 4 个煤矿的不同工作场所,通过部署矿用通信终端和矿用通信基站,实现不同场景下的通信性能测试,包括矿用 5G 上行传输速率、极限覆盖距离等。测试频段为国家无线电管理机构最新重耕的 900 MHz 5G 频段,测试带宽为 15 MHz,测试目标为实现远距离覆盖,为后续制定矿用通信装备部署策略提供参考。

3.1 辅运巷道

辅运巷道的矿用 5G 传输性能在煤矿 1 的辅运巷道进行测试,测试场地在 450 m 内地面相对平整,

450 m 之外存在一定程度的地面高低起伏。测试过程中,将矿用低频模组部署在距矿用 5G 基站 700 m 范围内进行上行传输速率的测试,测试环境如图 3 所示,测试结果如图 4 所示。可看出 400 m 处的上行传输速率为 83 Mbit/s, 450 m 之后出现地面高低起伏后,传输速率快速下降,之后相对稳定下降,700 m 处的上行传输速率为 4 Mbit/s, 极限覆盖距离超过 700 m。

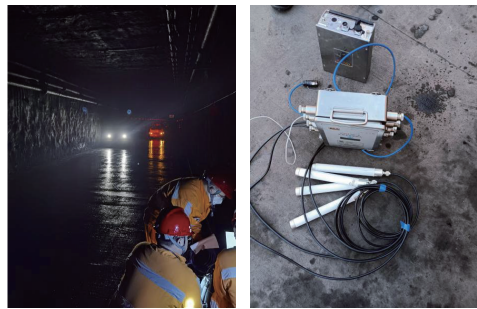


图 3 煤矿 1 辅运巷道现场测试环境

Fig. 3 Field testing environment of auxiliary transportation roadway in Coal Mine 1

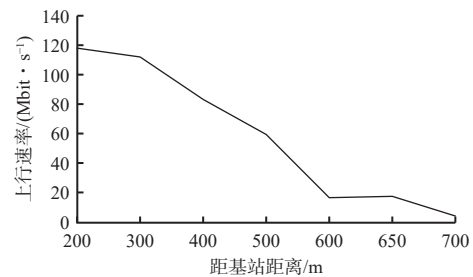


图 4 煤矿 1 辅运巷道测试结果

Fig. 4 Testing results of auxiliary transport roadway in Coal Mine 1

3.2 主运巷道

在煤矿 2 的 106 中区主运巷道开展矿用 5G 传输性能测试,结果如图 5 所示。可看出矿用 900 MHz 模组距矿用 5G 基站 400 m 处上行传输速率可达 32.3 Mbit/s, 极限覆盖距离可达 450 m 左右。

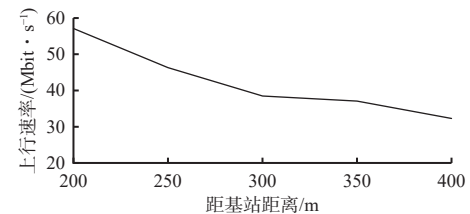


图 5 煤矿 2 主运巷道测试结果

Fig. 5 Testing results of main transport roadway in Coal Mine 2

3.3 综采工作面

综采工作面的矿用 5G 传输性能在煤矿 3 的 12201 综采工作面进行测试。工作面全长约 250 m, 高度 1.7 m 左右, 共部署 147 台液压支架, 支架间隔

约 1.7 m, 分别在第 26 台和第 131 台液压支架上部署矿用 5G 基站, 在第 8, 38, 68, 98, 128, 141 台液压支架上部署矿用模组并进行上行传输速率测试。测试环境如图 6 所示, 测试结果如图 7 所示。可看出各终端的上行传输速率基本为 90~120 Mbit/s, 可实现综采工作面矿用 5G 信号的稳定覆盖。

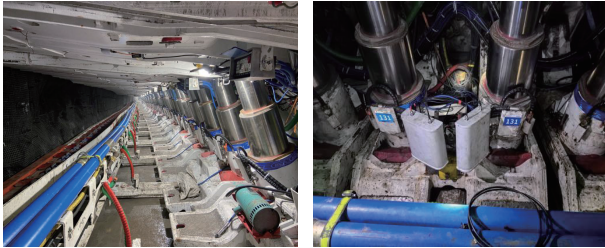


图 6 煤矿 3 综采工作面现场测试环境

Fig. 6 Field testing environment of fully mechanized mining face in Coal Mine 3

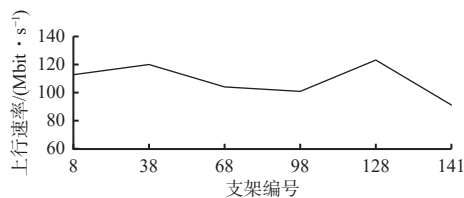


图 7 煤矿 3 综采工作面现场测试结果

Fig. 7 Testing results of fully mechanized mining face in Coal Mine 3

3.4 掘进工作面

掘进工作面的矿用 5G 传输性能在煤矿 4 的掘进工作面进行测试。测试过程中掘进长度为 150 m, 每隔 50 m 部署 1 台矿用 5G 模组, 测试上行传输速率。测试环境如图 8 所示, 测试结果如图 9 所示。可看出距矿用 5G 通信基站 150 m 处上行传输速率为 68.2 Mbit/s。



图 8 煤矿 4 掘进工作面现场测试环境

Fig. 8 Field testing environment of excavation working face in Coal Mine 4

现场测试结果与理论分析结果基本一致, 各工作场所的矿用 5G 网络覆盖均可满足日常应用需求,

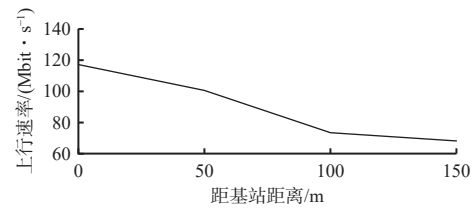


图 9 煤矿 4 掘进工作面测试结果

其中辅运巷道由于信号传输条件较优, 实现了最佳的矿用 5G 传输性能。

4 结论

1) 分析了井下影响矿用 5G 传输性能的多重因素, 通过理论分析及仿真得出结论: 工作频段越低, 工作面或巷道截面面积越大, 巷道壁粗糙度越小, 遮挡因素越少, 则矿用 5G 传输性能越好。

2) 定性分析了井工煤矿不同工作场所的矿用 5G 覆盖性能。相较于宽敞、巷道壁平整、遮挡因素较少的辅运巷道, 主运巷道、综采工作面和掘进工作面均会因为大型机械设备遮挡、巷道壁较为粗糙、粉尘和水汽等因素影响信号的传输性能和覆盖距离。

3) 采用 15 MHz 载波的 900 MHz 频段在 4 个煤矿的不同工作场所开展现场测试。煤矿 1 的辅运巷道测试结果显示, 矿用 5G 模组距矿用 5G 基站 400 m 处上行传输速率可达 83 Mbit/s, 极限覆盖距离超过 700 m; 煤矿 2 的 106 中区主运巷道测试结果显示, 距矿用 5G 基站 400 m 处上行传输速率达 32.3 Mbit/s, 满足无人化机器人巡检的无线传输需求, 极限覆盖距离超过 450 m; 煤矿 3 的综采工作面测试结果显示, 工作面上行传输速率均在 90~120 Mbit/s 之间; 煤矿 4 的掘进工作面测试结果显示, 距矿用 5G 基站 150 m 处上行传输速率可达 68.2 Mbit/s。

4) 为了实现井下各类环境 5G 连续稳定覆盖, 宜采用 1 GHz 以下的低频段 5G 信号进行传输与覆盖, 并可采用小型化模组嵌入关键设备中实现设备无线化传输, 有效实现井下 5G 应用场景的构建。

参考文献(References):

- [1] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 1-7.
SUN Jiping. Coal mine intelligence and mine-used 5G[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 1-7.
- [2] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.
WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.

- [3] 何勇, 徐元涛. 5G 通信技术在智能化煤矿的应用与研究[J]. *能源与节能*, 2023(3): 167-169, 173.
HE Yong, XU Yuantao. Application and research of 5G communication technology in intelligent coal mines[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2023(3): 167-169, 173.
- [4] 王国法, 赵国瑞, 胡亚辉. 5G 技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 16-23.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 16-23.
- [5] NB/T 11546—2024 煤矿用 5G 通信系统通用技术条件[S].
NB/T 11546-2024 General specification of 5G communication system for coal mines[S].
- [6] 中国通信标准化协会. 2023B142—面向矿山行业的 5G 专网通信标准体系研究[R/OL]. [2024-11-01]. <https://www.ccsa.org.cn/webadmin/#/td-standardproject/projectplan/public>.
CCSA. Research on 5G mining industry network communication standard system[R/OL]. [2024-11-01]. <https://www.ccsa.org.cn/webadmin/#/td-standardproject/projectplan/public>.
- [7] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(1): 181-202.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. System engineering and key technologies research and practice of smart mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(1): 181-202.
- [8] 郝俊信. 综掘机远程可视化智能掘进技术的研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(增刊 2): 274-279.
HAO Junxin. Research on long-distance visual intelligent tunneling technology of full-mechanized driving machine[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(S2): 274-279.
- [9] 孙继平. 智能矿山信息综合承载网与网络切片路由器[J]. *智能矿山*, 2023, 4(1): 14-17.
SUN Jiping. Intelligent mine information integrated bearer network and network slicing router[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2023, 4(1): 14-17.
- [10] 李晨鑫. 煤矿用 5G 关键技术研究现状与发展方向[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(7): 79-88.
LI Chenxin. Research status and development direction of 5G key technologies for coal mines[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(7): 79-88.
- [11] 李晨鑫, 张立亚, 刘斌, 等. 基于 5G 直连通信的矿井应急通信技术[J]. *煤矿安全*, 2023, 54(2): 212-216.
LI Chenxin, ZHANG Liya, LIU Bin, et al. Mine emergency communication technologies based on 5G sidelink communication[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(2): 212-216.
- [12] 侯刚, 王国法, 薛忠新, 等. 煤矿辅助运输自动驾驶关键技术与装备[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022, 4(3): 5-17.
HOU Gang, WANG Guofa, XUE Zhongxin, et al. Key technologies and equipment for automatic driving of coal mine auxiliary transportation[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022, 4(3): 5-17.
- [13] 康守信. 基于无线 Mesh 网络的矿用应急通信基站的研究[J]. *矿山机械*, 2023, 51(1): 52-56.
KANG Shouxin. Research on mining emergency communication base station based on wireless Mesh network[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2023, 51(1): 52-56.
- [14] 柴尚东. 矿用自适应带式输送机机道巡检系统设计与实现[J]. *矿业装备*, 2024(6): 150-152.
CHAI Shangdong. Design and implementation of track inspection system for mine adaptive belt conveyor[J]. *Mining Equipment*, 2024(6): 150-152.
- [15] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
FAN Changxin, CAO Lina. Principles of communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [16] 范京道, 闫振国, 李川. 基于 5G 技术的煤矿智能化开采关键技术探索[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 92-97.
FAN Jingdao, YAN Zhenguo, LI Chuan. Exploration of intelligent coal mining key technology based on 5G technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 92-97.
- [17] EMSLIE A G, LAGACE R L, STRONG P F. Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1975, 23(2): 192-205.
- [18] 姚善化, 吴先良, 张量. 矿井巷道壁粗糙度对电磁波传播损耗的影响[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2010, 33(11): 1725-1727, 1732.
YAO Shanhua, WU Xianliang, ZHANG Liang. Influence of rough wall on electromagnetic waves propagation attenuation in mine tunnels[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 2010, 33(11): 1725-1727, 1732.
- [19] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100GHz[R/OL]. [2024-11-01]. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.901/38901-i00.zip.
- [20] 霍振龙, 肖松, 孟玮, 等. 矿井 5G 无线通信系统关键技术及装备研发与示范应用[J]. *智能矿山*, 2022, 3(4): 55-60.
HUO Zhenlong, XIAO Song, MENG Wei, et al. Research and development and demonstration application of key technologies and equipment of mine 5G wireless communication system[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2022, 3(4): 55-60.
- [21] 冯伟. 煤矿综采工作面智能化开采[J]. *能源与节能*, 2023(5): 138-140.
FENG Wei. Intelligent mining of fully mechanized coal mining face in coal mines[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2023(5): 138-140.