

文章编号: 1671-251X(2024)10-0001-12

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18221

矿井无线传输测试分析与矿用 5G 优选工作频段研究

孙继平¹, 彭铭¹, 刘斌²

(1. 中国矿业大学(北京)人工智能学院, 北京 100083;

2. 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司 羊场湾煤矿, 宁夏 银川 750408)

摘要: 矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统等研发和布置, 需进行矿井无线传输特性分析, 优选无线工作频段, 优化无线通信基站和定位分站布置。在矿井拐弯巷道、分支巷道、辅助运输大巷、掘进巷道、综采工作面中进行了 350 MHz~6 GHz 较大频率范围的无线传输测试, 并对测试结果进行了分析, 揭示了矿井无线传输特性: ① 拐弯巷道中无线传输频率越低, 衰减越小, 其中 350 MHz~900 MHz 频段的无线传输衰减最小。② 分支巷道中无线传输频率越低, 衰减越小, 其中 350 MHz~900 MHz 频段的无线传输衰减最小。③ 辅助运输大巷中 700 MHz~900 MHz 频段的无线传输衰减最小。④ 掘进巷道中 700 MHz~900 MHz 频段的无线传输衰减最小。⑤ 综采工作面中 433 MHz~1 300 MHz 频段的无线传输衰减最小。⑥ 在巷道断面相同的情况下, 拐弯巷道中的无线传输衰减小于分支巷道, 支巷发射的分支巷道中的无线传输衰减小于主巷发射的分支巷道。巷道拐弯和分支均增加了无线传输衰减。提出了煤矿井下无线通信系统的优选工作频段与天线在拐弯和分支巷道中的最佳布置方式: ① 煤矿井下无线通信系统的工作频段应优选 700 MHz~900 MHz。② 为减小巷道拐弯和分支对无线传输的影响, 无线通信基站和定位分站及其天线应设置在拐弯巷道的拐点和分支巷道的分支点。研究成果已被中华人民共和国能源行业标准 NB/T 11546—2024《煤矿用 5G 通信系统通用技术条件》、NB/T 11523—2024《煤矿用 5G 通信基站》和 NB/T 11547—2024《煤矿用 5G 通信基站控制器》应用。

关键词: 矿井无线传输; 无线工作频段; 5G; 基站布置; 天线设置

中图分类号: TD655

文献标志码: A

Analysis of wireless transmission tests in mines and preferred working frequency bands for mining 5G

SUN Jiping¹, PENG Ming¹, LIU Bin²

(1. School of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. Yangchangwan Coal Mine, CHN Energy Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan 750408, China)

Abstract: The development and deployment of mobile communication systems, personnel and vehicle positioning systems in mines require an analysis of wireless transmission characteristics, the selection of preferred working frequency bands, and the optimization of wireless communication base stations and positioning substations. In this study, wireless transmission tests were conducted in a large frequency range from 350 MHz to 6 GHz in mine environments such as curved tunnels, branch tunnels, main transportation tunnels, excavation

收稿日期: 2024-10-13; 修回日期: 2024-10-21; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52074305); 国家重点研发计划项目(2016YFC0801800)。

作者简介: 孙继平(1958—), 男, 山西翼城人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 中国矿业大学(北京)原副校长; 获国家科技进步奖和技术发明奖二等奖 4 项(第 1 完成人 3 项); 作为第 1 完成人获省部级科技进步特等奖和一等奖 9 项; 作为第 1 完成人主持制定中华人民共和国煤炭行业、安全生产行业和能源行业标准 51 项; 作为第 1 发明人获国家授权发明专利 130 余件; 主持制定《煤矿安全规程》第十一章“监控与通信”; 被 SCI 和 EI 检索的第 1 作者或独立完成论文 100 余篇; 作为第 1 作者或独立完成著作 12 部; 作为国务院煤矿事故调查专家组组长参加了 10 起煤矿特别重大事故调查工作; E-mail: sjp@cumtb.edu.cn。



扫码移动阅读

引用格式: 孙继平, 彭铭, 刘斌. 矿井无线传输测试分析与矿用 5G 优选工作频段研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(10): 1-11, 20.

SUN Jiping, PENG Ming, LIU Bin. Analysis of wireless transmission tests in mines and preferred working frequency bands for mining 5G[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(10): 1-11, 20.

tunnels, and fully mechanized mining faces. The test results were analyzed, revealing the characteristics of wireless transmission in mines: ① In curved tunnels, the lower the wireless transmission frequency, the smaller the attenuation, with the least attenuation in the 350 MHz to 900 MHz frequency band. ② In branch tunnels, the lower the frequency, the smaller the attenuation, with the least attenuation in the 350 MHz to 900 MHz frequency band. ③ In main transportation tunnels, the least wireless transmission attenuation was found in the 700 MHz to 900 MHz frequency band. ④ In excavation tunnels, the least attenuation was in the 700 MHz to 900 MHz frequency band. ⑤ In fully mechanized mining faces, the least attenuation was observed in the 433 MHz to 1 300 MHz frequency band. ⑥ With the same cross-sectional area of the tunnels, wireless transmission attenuation in curved tunnels was smaller than in branch tunnels, and the attenuation in branch tunnels emitted from branch sources was smaller than that emitted from main tunnels. Curves and branches in tunnels increased wireless transmission attenuation. Furthermore, this paper proposed the preferred working frequency bands and the best arrangement of antennas for wireless communication systems in underground coal mines, specifically in curved and branch tunnels: ① The working frequency bands for underground wireless communication systems should preferably be in the 700 MHz to 900 MHz range. ② To minimize the impact of curves and branches in tunnels on wireless transmission, wireless communication base stations, positioning substations, and their antennas should be set at the turning points of curved tunnels and at the branch points of branch tunnels. The research results have been applied to the People's Republic of China energy industry standards NB/T 11546-2024 *General specification of 5G communication system for coal mines*, NB/T 11523-2024 *5G communication base station for coal mines*, and NB/T 11547-2024 *5G communication baseband controller for coal mines*.

Key words: mine wireless transmission; wireless working frequency bands; 5G; base station arrangement; antenna setup

0 引言

5G, 5.5G, WiFi6, WiFi7, UWB, ZigBee 等矿井移动通信系统、人员和车辆定位系统等的研发和布置,需进行矿井无线传输特性分析,优选无线工作频段,优化无线通信基站和定位分站布置,在保证通信效果的前提下,减少无线通信基站和定位分站数量,降低系统成本和维护工作量^[1-4]。国家标准 GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第 1 部分:设备 通用要求》^[5]无线电波发射功率不得大于 6 W 的限制,制约了矿井无线传输距离,增加了无线通信基站和定位分站的用量,增大了系统建设成本和维护工作量^[6-11]。在无线电波发射功率受限、接收灵敏度一定的情况下,选择衰减较小的无线传输频段,可有效提高单个无线通信基站和定位分站的无线信号覆盖范围,减小无线通信基站和定位分站的用量,降低系统建设成本和维护工作量^[12-13]。目前通过理论分析和电磁仿真研究矿井无线传输衰减的较多,但误差较大;矿井现场测试分析的较少,难以满足优化无线工作频段及无线通信基站和定位分站布置的需求^[14-16]。因此,笔者进行了 350 MHz~6 GHz 较大频率范围的煤矿井下无线传输测试,并对测试结果进行了分析研究,揭示了矿井无线传输特性,提出了煤矿井下无线

通信系统(以下简称矿用无线通信系统)的优选工作频段。

1 矿井测试环境与测试方法

1.1 测试环境

笔者于 2023 年 6 月在国家能源集团宁夏煤业有限责任公司羊场湾煤矿进行了 350 MHz~6 GHz 频段的无线传输测试,测试地点情况如下: ① 宽度为 5.5 m、高度为 4.1 m 的半圆拱形+矩形断面(以下简称半圆拱形断面)拐弯巷道,拐弯巷道的拐角为 66°,测试长度为 40 m,如图 1(a)和图 1(b)所示。② 宽度为 5.5 m、高度为 4.1 m 的半圆拱形断面分支巷道,分支巷道为直角 T 字型,测试长度为 40 m,如图 1(a)和图 1(c)所示。③ 宽度为 5.6 m、高度为 4.6 m 的半圆拱形断面辅助运输大巷(以下简称辅运大巷 1),平直段测试长度为 410 m,如图 1(d)所示。④ 宽度为 3.8 m、高度为 3.6 m 的半圆拱形断面辅助运输大巷(以下简称辅运大巷 2),平直段测试长度为 200 m,如图 1(e)所示。⑤ 宽度为 5.4 m、高度为 3.4 m 的梯形断面掘进巷道,掘进巷道一侧安装有宽 2 m 的带式输送机,平直段测试长度为 500 m,如图 1(f)所示。⑥ 下底宽度为 3.4 m、上底宽度为 3.1 m、高度为 1.7 m 的梯形断面综采工作面,综采工作面平均坡度为 10°,测试长度为 98 m,如图 1(g)所示。

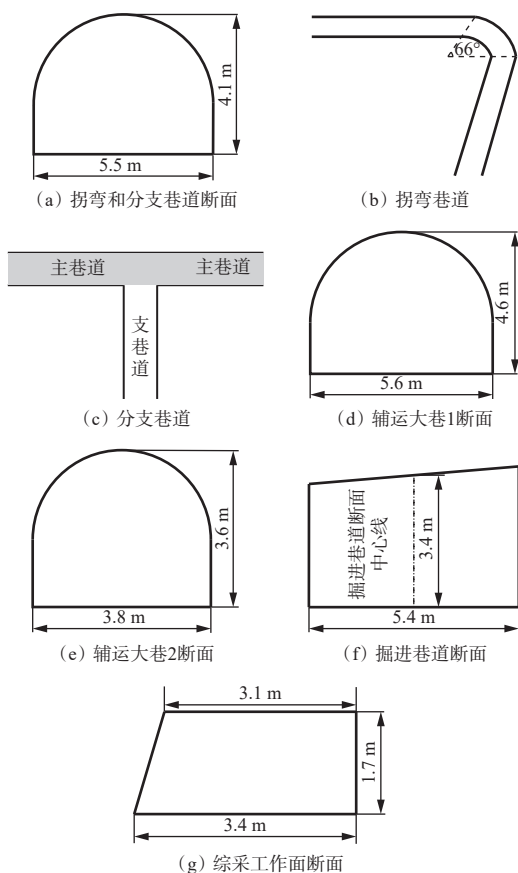


图1 测试地点

Fig. 1 Test sites

1.2 测试设备及测试方法

测试设备: 1台便携式射频信号发生器 BPSG6, 其发射频段为 23.5 MHz~6 GHz, 最大发射功率为 +18 dBm; 1台便携式实时频谱分析仪 V6-RSA250X, 其测量频段为 10 MHz~6 GHz, 最大实时带宽为 80 MHz, 显示平均噪声电平为 -170 dBm/Hz; 2根对数周期天线 TN306, 其工作频段为 350 MHz~8 GHz, 典型增益为 6 dBi; 1根长 0.3 m 的 SMA 射频馈线、1根长 1 m 的 SMA 射频馈线、2个高 2.06 m 的可伸缩三角支架和 2 台笔记本电脑。

根据矿用 5G, 5.5G, Wi-Fi6, Wi-Fi7, UWB, ZigBee 等矿井人员定位系统^[17]、移动通信系统^[18-21]、无线视频和无线传感器使用频段, 无线传输测试频点选择 350, 433, 550, 700, 800, 900, 1 300, 1 700, 1 900, 2 100, 2 400, 2 600, 3 300, 3 500, 4 200, 4 900, 5 400, 6 000 MHz。

矿井拐弯巷道、分支巷道、辅助运输大巷、掘进巷道、综采工作面的测试设备布置如图 2 所示。在无线发射端, 将固定在可伸缩三脚架上的便携式射频信号发生器通过射频馈线与对数周期天线相连, 并通过数据线与笔记本电脑连接, 使用笔记本电脑上预装的 Aaronia AG-HF Generator 软件设置射频信

号的频率和功率。在无线接收端, 将便携式实时频谱分析仪通过射频馈线与对数周期天线连接, 并通过数据线与笔记本电脑连接, 使用笔记本电脑上预装的 Aaronia RTSA-Suite PRO 软件实时记录无线传输接收功率测试值。发射设备及发射天线固定不动, 设定频率和发射功率为某一定值, 沿巷道轴向移动接收设备及接收天线, 并在每个测试点处测试 100 个数据取平均值, 即为该测试点无线传输接收功率。

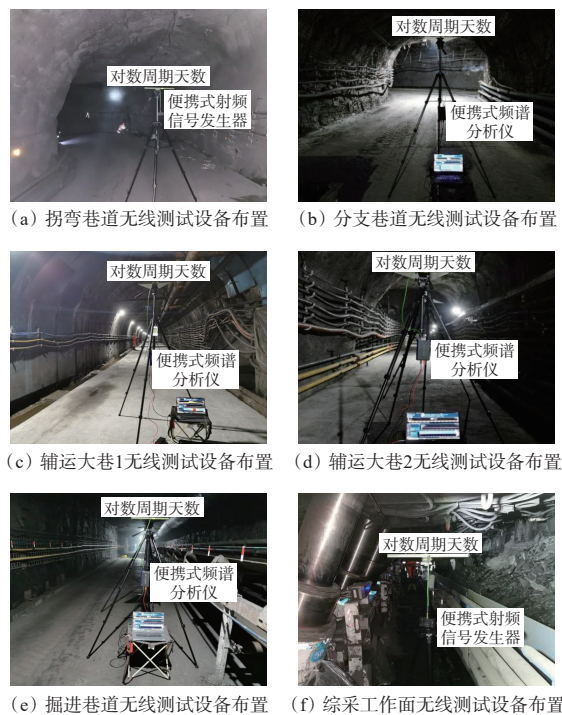


图2 测试设备布置

Fig. 2 Test equipment layout

2 拐弯巷道无线传输测试分析及优选工作频段

发射设备及发射天线固定不动, 收发天线均置于拐弯巷道断面中央, 将便携式射频信号发生器的输出功率设置为 +13 dBm。如图 3 所示, 将发射天线置于巷道拐点前 20 m 处, 并将接收天线分别置于拐点后 4, 8, 12, 16, 20 m 处 (即收发天线分别相距 24, 28, 32, 36, 40 m), 测试不同频率和距离下无线传输接收功率, 数据见表 1, 曲线如图 4 所示。

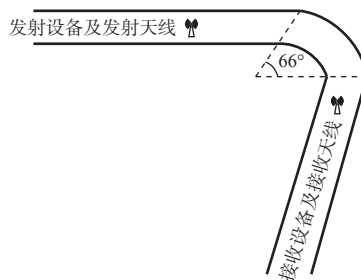


图3 拐弯巷道无线收发天线布置

Fig. 3 Layout of wireless transmitting and receiving antenna in a curved roadway

表 1 拐弯巷道中不同频率和距离下无线传输接收功率数据

Table 1 Received power data of wireless transmission at different frequencies and distances in a curved roadway

收发 天线 距离/m	无线传输接收功率/dBm																	
	350 MHz	433 MHz	550 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1 300 MHz	1 700 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	2 400 MHz	2 600 MHz	3 300 MHz	3 500 MHz	4 200 MHz	4 900 MHz	5 400 MHz	6 000 MHz
24	-22.28	-22.82	-32.40	-35.15	-37.62	-42.91	-42.60	-41.86	-46.21	-51.59	-45.72	-46.04	-50.76	-51.58	-48.47	-50.90	-56.32	-56.32
28	-22.20	-25.12	-32.24	-45.18	-34.56	-42.98	-54.95	-50.55	-45.21	-58.01	-49.25	-59.45	-60.23	-61.59	-61.76	-64.29	-63.21	-60.06
32	-34.21	-40.98	-34.27	-38.93	-48.81	-47.36	-45.27	-59.60	-49.38	-62.11	-71.49	-55.17	-67.06	-60.63	-62.60	-75.08	-67.38	-74.03
36	-40.55	-48.27	-45.66	-48.81	-45.17	-48.50	-50.72	-62.06	-59.00	-65.62	-62.13	-73.12	-66.40	-75.20	-69.70	-71.04	-69.24	-70.19
40	-37.84	-32.15	-35.25	-61.54	-46.72	-49.25	-55.87	-65.36	-56.72	-65.15	-68.50	-67.28	-67.04	-71.11	-64.93	-69.70	-76.87	-72.05

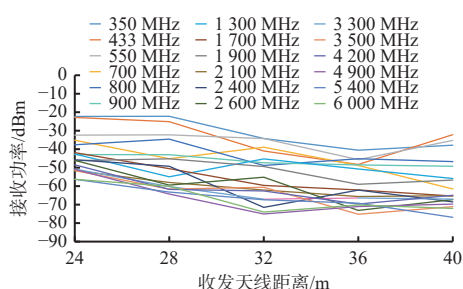


图 4 拐弯巷道中不同频率和距离下无线传输接收功率曲线

Fig. 4 Received power curve of wireless transmission at different frequencies and distances in a curved roadway

为了便于分析,将拐弯巷道中拐点后 20 m 内的无线传输接收功率数据按不同频率取平均值,得到拐弯巷道中不同频率下无线传输平均接收功率,见表 2。

表 2 拐弯巷道中不同频率下无线传输平均接收功率

Table 2 Average received power of wireless transmissions at different frequencies in a curved roadway

频率/MHz	无线传输 平均接收功率/dBm	频率/MHz	无线传输 平均接收功率/dBm
350	-31.42	2 100	-60.50
433	-33.87	2 400	-59.42
550	-35.96	2 600	-60.21
700	-45.92	3 300	-62.30
800	-42.58	3 500	-64.02
900	-46.20	4 200	-61.49
1 300	-49.88	4 900	-66.20
1 700	-55.89	5 400	-66.60
1 900	-51.30	6 000	-66.53

由表 1、表 2 和图 4 可知,从整体趋势来看,在 350 MHz~6 GHz 频段,无线传输频率越高,拐弯巷道的平均接收功率越低,即频率越低,拐弯巷道的无线传输衰减越小。拐弯巷道在 350 MHz~900 MHz

频段的无线传输平均接收功率最大,拐弯巷道中的无线传输平均接收功率最大值为-31.42 dBm(对应频率为 350 MHz),在 350 MHz~900 MHz 频段的无线传输平均接收功率为-39.33 dBm。因此,在 350 MHz~6 GHz 频段,拐弯巷道中矿用无线通信系统的无线工作频段应优选 350 MHz~900 MHz。

3 分支巷道无线传输测试分析及优选工作频段

发射设备及发射天线固定不动,收发天线均置于分支巷道断面中央,将便携式射频信号发生器的输出功率设置为+13 dBm。分支巷道的无线传输测试分为支巷发射和主巷发射 2 种测试。① 支巷发射测试:将发射天线置于距分支点 20 m 的支巷道中,如图 5(a)所示,接收天线分别置于距分支点 4, 8, 12, 16, 20 m 的主巷道中(即收发天线分别相距 24, 28, 32, 36, 40 m),测试不同频率和距离下无线传输接收功率,数据见表 3,曲线如图 6 所示。② 主巷发射测试:将发射天线置于距分支点 20 m 的主巷道中,如图 5(b)所示,接收天线分别置于距分支点 4, 8, 12, 16, 20 m 的支巷道中(即收发天线分别相距 24, 28, 32, 36, 40 m),测试不同频率和距离下无线传输接收功率,数据见表 4,曲线如图 7 所示。

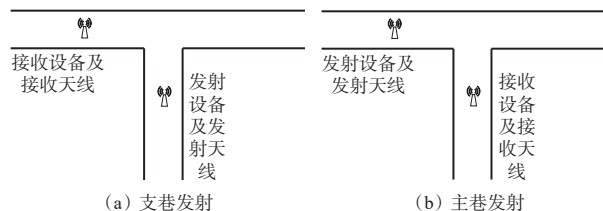


图 5 分支巷道无线收发天线布置

Fig. 5 Layout of wireless transmitting and receiving antenna in a branch roadway

为便于分析,将分支巷道中分支点后 20 m 内的无线传输接收功率数据按不同频率取平均值,分别得到支巷发射和主巷发射时分支巷道不同频率下无线传输平均接收功率,见表 5。

表3 支巷发射时分支巷道不同频率和距离下无线传输接收功率数据

Table 3 Received power data of wireless transmission at different frequencies and distances in a branch roadway with transmitting equipment in a split roadway

收发 天线 距离/m	无线传输接收功率/dBm																	
	350 MHz	433 MHz	550 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1 300 MHz	1 700 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	2 400 MHz	2 600 MHz	3 300 MHz	3 500 MHz	4 200 MHz	4 900 MHz	5 400 MHz	6 000 MHz
24	-35.99	-24.06	-32.52	-38.29	-37.34	-41.62	-56.66	-35.73	-41.53	-56.73	-49.38	-47.26	-50.90	-47.12	-46.31	-48.80	-61.25	-56.25
28	-32.29	-27.52	-30.38	-49.04	-44.61	-43.36	-45.69	-53.94	-53.64	-47.57	-56.76	-47.23	-67.48	-52.89	-58.82	-56.88	-62.55	-69.30
32	-33.11	-31.06	-43.47	-50.32	-48.58	-45.68	-50.07	-58.09	-59.59	-59.33	-67.01	-57.71	-67.10	-64.37	-67.49	-65.69	-65.94	-66.59
36	-36.68	-38.25	-43.78	-47.44	-43.86	-49.38	-53.87	-58.77	-54.76	-61.33	-71.02	-61.45	-68.94	-65.70	-72.55	-70.06	-68.10	-74.35
40	-39.07	-38.04	-48.29	-50.03	-53.87	-58.54	-58.87	-66.02	-64.92	-67.78	-75.75	-65.23	-78.82	-72.98	-70.17	-88.03	-70.94	-74.19

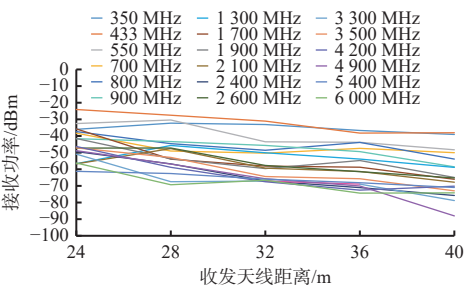


图6 支巷发射时分支巷道不同频率和距离下无线传输接收功率曲线

Fig. 6 Received power curve of wireless transmission at different frequencies and distances in a branch roadway with transmitting equipment in a split roadway

由表3、表5和图6可知,从整体趋势来看,在350 MHz~6 GHz频段内,在支巷发射的分支巷道中,无线传输频率越高,平均接收功率越低,即频率越低,无线传输衰减越小。支巷发射时分支巷道在350 MHz~900 MHz频段的无线传输平均接收功率最大,支巷发射时分支巷道中的无线传输平均接收功率最大值为-31.79 dBm(对应频率为433 MHz),在350 MHz~900 MHz频段的无线传输平均接收功率为-41.22 dBm。因此,在350 MHz~6 GHz频段内,支巷发射的分支巷道中矿用无线通信系统的工作频段应优选350 MHz~900 MHz。

表4 主巷发射时分支巷道不同频率和距离下无线传输接收功率数据

Table 4 Received power data of wireless transmission at different frequencies and distances in a branch roadway with transmitting equipment in a main roadway

收发 天线 距离/m	无线传输接收功率/dBm																	
	350 MHz	433 MHz	550 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1 300 MHz	1 700 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	2 400 MHz	2 600 MHz	3 300 MHz	3 500 MHz	4 200 MHz	4 900 MHz	5 400 MHz	6 000 MHz
24	-32.45	-29.13	-37.34	-51.59	-46.13	-43.63	-34.52	-56.16	-45.59	-45.07	-58.16	-60.65	-54.62	-54.58	-49.42	-57.12	-54.99	-53.00
28	-41.37	-37.00	-42.61	-47.94	-57.57	-45.77	-51.76	-56.48	-56.06	-63.36	-61.58	-64.74	-61.74	-57.40	-60.39	-76.91	-59.36	-63.17
32	-32.71	-36.42	-40.75	-52.02	-57.59	-52.03	-50.94	-48.91	-49.96	-54.91	-65.85	-68.14	-71.12	-62.02	-60.43	-71.24	-73.88	-63.52
36	-44.05	-33.22	-60.76	-46.13	-49.06	-46.04	-55.97	-67.89	-55.64	-76.82	-64.63	-66.53	-69.98	-67.52	-69.34	-70.69	-82.48	-73.71
40	-43.41	-42.05	-57.47	-60.01	-62.31	-63.70	-63.66	-60.56	-65.00	-65.90	-63.97	-69.90	-70.66	-75.86	-70.16	-75.49	-78.04	-77.17

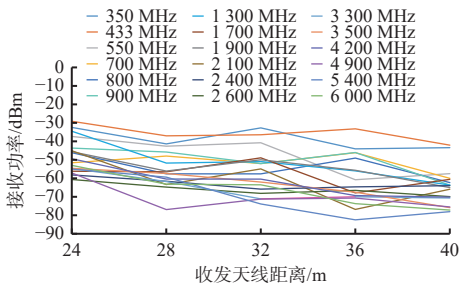


图7 主巷发射时分支巷道不同频率和距离下无线传输接收功率曲线

Fig. 7 Received power curve of wireless transmission at different frequencies and distances in a branch roadway with transmitting equipment in a main roadway

由表4、表5和图7可知,从整体趋势来看,在350 MHz~6 GHz频段内,在主巷发射的分支巷道中,无线传输频率越高,平均接收功率越低,即频率越低,无线传输衰减越小。主巷发射时分支巷道在350 MHz~1 900 MHz频段的无线传输平均接收功率最大,主巷发射时分支巷道中的无线传输平均接收功率最大值为-35.56 dBm(对应频率为433 MHz),在350 MHz~1 900 MHz频段的无线传输平均接收功率为-49.14 dBm。因此,在350 MHz~6 GHz频段内,主巷发射的分支巷道中矿用无线通信系统的工作频段应优选350 MHz~1 900 MHz。

表 5 分支巷道不同频率下无线传输平均接收功率
Table 5 Average received power of wireless transmissions at different frequencies in a branch roadway

频率/ MHz	支巷发射时 分支巷道中 无线传输 平均接收 功率/dBm	主巷发射时 分支巷道中 无线传输 平均接收 功率/dBm	频率/ MHz	支巷发射时 分支巷道中 无线传输 平均接收 功率/dBm	主巷发射时 分支巷道中 无线传输 平均接收 功率/dBm
350	-35.43	-38.80	2 100	-58.55	-61.21
433	-31.79	-35.56	2 400	-63.98	-62.84
550	-39.69	-47.79	2 600	-55.78	-65.99
700	-47.02	-51.54	3 300	-66.65	-65.62
800	-45.65	-54.53	3 500	-60.61	-63.48
900	-47.72	-50.23	4 200	-63.07	-61.95
1 300	-53.03	-51.37	4 900	-65.89	-70.29
1 700	-54.51	-58.00	5 400	-65.76	-69.75
1900	-54.89	-54.45	6 000	-68.14	-66.11

综合考虑主巷发射和支巷发射时分支巷道中的无线传输衰减,分支巷道中矿用无线通信系统的工作频段应优选 350 MHz~900 MHz。

4 拐弯和分支巷道无线传输比较分析

发射设备及发射天线固定不动,收发天线均置于与拐弯、分支巷道断面相同的平直巷道断面中央,设置便携式射频信号发生器的输出功率为+13 dBm。

表 6 平直巷道中不同频率和距离下无线传输接收功率

Table 6 Received power of wireless transmission at different frequencies and distances in a straight roadway

收发 天线 距离/m	无线传输接收功率/dBm																		
	350 MHz	433 MHz	550 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1 300 MHz	1 700 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	2 400 MHz	2 600 MHz	3 300 MHz	3 500 MHz	4 200 MHz	4 900 MHz	5 400 MHz	6 000 MHz	
24	-18.34	-20.49	-20.47	-27.64	-33.14	-33.21	-37.67	-41.62	-33.66	-37.94	-56.94	-38.67	-48.72	-39.26	-72.71	-49.75	-54.59	-45.46	
28	-22.52	-15.93	-25.41	-23.17	-30.45	-39.83	-36.07	-44.59	-37.21	-40.25	-41.45	-38.22	-46.69	-55.20	-43.07	-45.60	-49.32	-47.99	
32	-21.36	-21.09	-23.64	-27.71	-25.27	-33.57	-45.50	-41.68	-41.28	-63.74	-53.05	-38.81	-63.47	-46.80	-54.36	-46.00	-56.70	-53.44	
36	-18.23	-24.37	-26.31	-28.55	-30.34	-35.08	-39.46	-43.34	-39.82	-40.71	-47.55	-43.74	-44.07	-48.51	-43.67	-49.65	-51.22	-49.94	
40	-21.80	-19.99	-27.85	-27.22	-28.29	-31.91	-48.94	-40.60	-34.16	-45.92	-46.68	-50.03	-49.29	-42.23	-50.14	-77.09	-52.49	-44.22	
平均接收 功率/dBm	-20.45	-20.37	-24.74	-26.86	-29.50	-34.72	-41.53	-42.37	-37.23	-45.71	-49.13	-41.89	-50.45	-46.40	-52.79	-53.62	-52.86	-48.21	

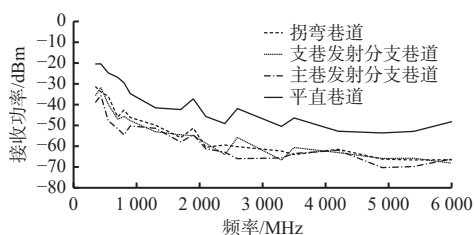


图 8 拐弯巷道、分支巷道和平直巷道中不同频率下无线传输平均接收功率曲线

Fig. 8 Average received power curve of wireless transmission at different frequencies in a curved, branch and straight roadways

将接收天线分别置于距离发射天线 24, 28, 32, 36, 40 m 处, 测试得到平直巷道中不同频率和距离下无线传输接收功率, 并将平直巷道中的无线传输接收功率数据按不同频率取平均值, 得到平直巷道中不同频率和距离下无线传输平均接收功率, 见表 6。

为便于比较分析, 分别将相同断面和长度的拐弯巷道、分支巷道和平直巷道中的无线传输接收功率数据取平均值, 得到拐弯巷道、分支巷道和平直巷道中不同频率下无线传输平均接收功率, 如图 8 所示。在 350 MHz~6 GHz 频段, 平直巷道中的无线传输平均接收功率为-39.93 dBm, 拐弯巷道中的无线传输平均接收功率为-53.35 dBm, 支巷发射的分支巷道中的无线传输平均接收功率为-54.34 dBm, 主巷发射的分支巷道中的无线传输平均接收功率为-57.20 dBm, 无线传输平均接收功率依次减小, 无线传输衰减依次增大。即在巷道断面相同的情况下, 平直巷道中的无线传输衰减小于拐弯巷道和分支巷道; 拐弯巷道中的无线传输衰减小于分支巷道; 支巷发射的分支巷道中的无线传输衰减小于主巷发射的分支巷道。巷道拐弯和分支均增加了无线传输衰减。因此, 无线通信基站和定位分站及其天线应设置在拐弯巷道的拐点和分支巷道的分支点, 以减小巷道拐弯和分支对无线传输的影响。

5 辅运大巷 1 无线传输测试分析及优选工作频段

发射设备及发射天线固定不动, 收发天线均置于辅运大巷 1 断面中央, 设置便携式射频信号发生器的输出功率为+13 dBm。将接收天线分别置于距离发射天线 1, 3, 5, 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170, 190, 210, 230, 250, 270, 290, 310, 330, 350, 370, 390, 410 m 处, 测试不同频率和距离下无线传输接收功率, 数据见表 7, 曲线如图 9 所示。

表7 辅运大巷1中不同频率和距离下无线传输接收功率数据

Table 7 Received power data of radio transmission at different frequencies and distances in auxiliary transport roadway 1

收发 天线 距离/m	无线传输接收功率/dBm																	
	350 MHz	433 MHz	550 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1 300 MHz	1 700 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	2 400 MHz	2 600 MHz	3 300 MHz	3 500 MHz	4 200 MHz	4 900 MHz	5 400 MHz	6 000 MHz
1	-14.58	-18.33	-18.66	-19.33	-39.92	-42.72	-21.18	-21.04	-20.27	-19.78	-20.62	-19.03	-22.82	-22.07	-22.74	-23.42	-26.96	-22.42
3	-11.25	-18.50	-23.41	-16.63	-14.48	-18.55	-25.61	-25.21	-23.01	-30.11	-25.61	-26.76	-28.25	-31.66	-30.89	-31.24	-34.18	-30.07
5	-13.70	-14.60	-21.19	-19.29	-25.63	-17.87	-28.85	-30.59	-26.69	-30.16	-28.18	-28.90	-37.04	-32.77	-32.91	-39.24	-41.72	-33.14
10	-21.20	-17.46	-20.77	-30.70	-22.75	-33.45	-26.89	-41.36	-30.35	-42.20	-53.86	-43.84	-36.18	-44.89	-47.46	-37.30	-51.37	-46.68
30	-41.03	-16.16	-21.92	-38.79	-31.29	-35.85	-36.44	-35.82	-36.37	-41.71	-44.27	-40.24	-43.50	-46.59	-51.08	-52.64	-46.49	-45.64
50	-31.20	-19.92	-35.25	-28.75	-32.30	-35.56	-45.02	-45.77	-43.11	-36.09	-50.82	-46.44	-56.57	-48.92	-46.98	-48.15	-60.87	-61.45
70	-30.14	-25.71	-28.91	-38.29	-36.62	-36.01	-45.10	-43.09	-50.50	-44.81	-50.74	-50.15	-49.44	-46.45	-53.23	-52.10	-50.12	-44.82
90	-37.50	-29.78	-34.36	-34.48	-37.30	-39.91	-42.57	-48.70	-47.24	-53.42	-54.93	-55.67	-53.29	-58.60	-46.88	-48.23	-61.16	-56.65
110	-44.20	-36.51	-40.81	-38.16	-39.68	-41.29	-40.80	-52.56	-46.25	-54.16	-58.60	-54.27	-51.43	-52.54	-50.38	-54.39	-60.18	-57.51
130	-48.33	-36.12	-39.70	-38.09	-40.49	-46.83	-45.49	-42.61	-52.57	-53.51	-54.05	-51.72	-58.54	-51.77	-59.83	-54.92	-61.72	-60.07
150	-53.51	-41.79	-43.44	-39.23	-38.78	-41.23	-47.21	-46.86	-51.09	-49.73	-54.06	-52.46	-72.57	-55.06	-63.98	-61.40	-67.39	-56.96
170	-58.66	-46.34	-43.02	-39.67	-41.44	-43.96	-45.61	-46.00	-45.34	-48.36	-52.39	-52.67	-65.97	-57.56	-61.50	-63.96	-65.06	-64.44
190	-60.40	-47.56	-45.00	-43.56	-42.47	-42.76	-50.27	-53.34	-48.85	-52.78	-55.35	-52.78	-64.40	-55.91	-68.19	-61.13	-58.29	-58.05
210	-64.17	-47.13	-47.22	-41.22	-50.13	-44.07	-48.15	-50.28	-50.75	-50.23	-51.44	-50.42	-55.78	-58.97	-65.31	-59.76	-64.02	-63.56
230	-66.72	-50.17	-46.80	-42.36	-41.30	-42.67	-46.00	-52.38	-50.18	-58.53	-52.88	-49.58	-57.95	-53.81	-66.03	-60.59	-68.02	-69.48
250	-70.91	-53.76	-49.18	-41.91	-43.76	-44.48	-45.13	-49.76	-48.26	-55.34	-61.82	-55.46	-59.62	-51.25	-64.03	-69.25	-72.77	-58.58
270	-75.07	-56.71	-50.31	-44.35	-41.89	-43.36	-47.85	-48.45	-48.10	-51.90	-59.29	-55.46	-61.17	-65.78	-57.22	-60.92	-61.29	-61.47
290	-77.84	-57.31	-54.54	-44.49	-46.12	-46.92	-50.54	-49.68	-48.02	-49.79	-54.73	-54.19	-56.81	-62.94	-59.96	-57.40	-62.10	-62.82
310	-81.64	-61.52	-52.73	-46.22	-43.93	-44.68	-49.30	-50.12	-51.23	-53.82	-52.26	-50.43	-55.49	-59.30	-55.97	-61.10	-61.19	-61.80
330	-82.00	-62.32	-58.79	-48.88	-46.52	-47.79	-48.64	-51.14	-50.25	-57.70	-55.87	-54.59	-58.07	-55.11	-57.48	-57.53	-62.35	-66.88
350	-82.93	-65.78	-56.82	-48.70	-47.81	-48.78	-49.57	-52.05	-50.03	-55.91	-61.41	-55.79	-62.26	-58.83	-55.76	-57.60	-67.10	-64.69
370	-84.90	-70.64	-62.62	-49.15	-48.90	-50.20	-49.31	-54.30	-53.62	-55.54	-70.89	-62.80	-56.92	-57.09	-53.74	-56.79	-60.03	-63.74
390	-84.97	-71.01	-61.15	-50.16	-49.05	-48.94	-52.25	-54.11	-51.56	-56.53	-62.73	-63.44	-57.85	-55.90	-54.20	-56.42	-61.75	-66.43
410	-85.36	-71.44	-67.62	-59.75	-49.60	-51.17	-50.56	-52.76	-56.44	-60.01	-63.76	-68.23	-66.33	-55.17	-55.06	-57.03	-57.53	-57.48

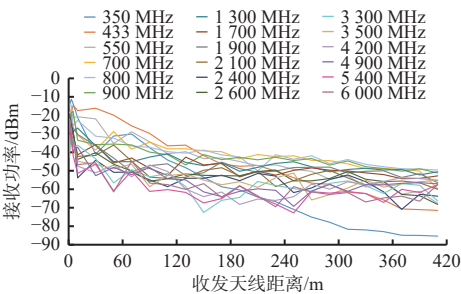


图9 辅运大巷1中不同频率和距离下无线传输接收功率曲线

Fig. 9 Received power curve of wireless transmission at different frequencies and distances in auxiliary transport roadway 1

为便于分析,将辅运大巷1中距发射天线前410 m的无线传输接收功率数据按不同频率取平均值,得到辅运大巷1中不同频率下无线传输平均接收功率,见表8。

由表7、表8和图9可知,在350 MHz~6 GHz频段内,辅运大巷1中700 MHz~900 MHz频段的无线传输平均接收功率最大,辅运大巷1中的无线传

表8 辅运大巷1中不同频率下无线传输平均接收功率

Table 8 Average received power of radio transmissions at different frequencies in auxiliary transport roadway 1

频率/MHz	无线传输平均接收功率/dBm	频率/MHz	无线传输平均接收功率/dBm
350	-55.09	2 100	-48.42
433	-43.19	2 400	-52.11
550	-42.68	2 600	-49.81
700	-39.26	3 300	-53.68
800	-39.67	3 500	-51.62
900	-41.21	4 200	-53.37
1 300	-43.26	4 900	-53.44
1 700	-45.75	5 400	-57.65
1 900	-45.00	6 000	-55.62

输平均接收功率最大值为-39.26 dBm(对应频率为700 MHz),在700 MHz~900 MHz频段的无线传输平均接收功率为-40.05 dBm。因此,在辅运大巷1中矿用无线通信系统的工作频段应优选700 MHz~

900 MHz。

6 辅运大巷 2 无线传输测试分析及优选工作频段

发射设备及发射天线固定不动,收发天线均置于辅运大巷 2 断面中央,设置便携式射频信号发生

器的输出功率为+13 dBm。将接收天线分别置于距离发射天线 1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 m 处,测试不同频率和距离下无线传输接收功率,数据见表 9,曲线如图 10 所示。

表 9 辅运大巷 2 中不同频率和距离下无线传输接收功率数据

Table 9 Received power data of wireless transmission at different frequencies and distances in auxiliary transport roadway 2

收发 天线 距离/m	无线传输接收功率/dBm																	
	350 MHz	433 MHz	550 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1 300 MHz	1 700 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	2 400 MHz	2 600 MHz	3 300 MHz	3 500 MHz	4 200 MHz	4 900 MHz	5 400 MHz	6 000 MHz
1	-14.38	-18.35	-23.20	-23.73	-21.78	-24.44	-25.16	-24.83	-24.45	-22.17	-22.13	-20.63	-22.60	-21.31	-21.64	-22.66	-26.43	-21.81
3	-11.11	-21.49	-23.23	-23.90	-21.63	-23.88	-21.94	-24.96	-25.20	-29.90	-26.70	-29.34	-33.84	-30.47	-31.13	-31.31	-37.58	-31.82
5	-11.22	-18.35	-23.39	-20.74	-20.80	-23.96	-41.17	-29.19	-31.19	-29.69	-34.68	-29.07	-31.76	-39.34	-35.42	-35.08	-38.69	-34.55
10	-18.12	-16.47	-20.72	-22.07	-20.16	-22.18	-27.53	-32.27	-31.45	-38.31	-44.81	-36.38	-38.13	-47.16	-36.26	-42.83	-42.17	-44.55
20	-22.15	-24.71	-21.04	-27.47	-28.57	-40.05	-36.16	-34.17	-34.15	-35.27	-39.04	-39.93	-48.68	-42.57	-43.14	-50.97	-43.55	-50.97
30	-27.06	-26.10	-26.10	-25.16	-25.66	-29.47	-54.14	-43.19	-45.00	-38.90	-43.05	-34.05	-49.52	-49.84	-44.98	-42.61	-50.41	-48.54
40	-36.21	-37.00	-33.27	-29.72	-28.97	-32.30	-43.30	-40.03	-35.83	-47.12	-49.74	-47.27	-47.29	-65.30	-62.23	-56.13	-48.12	-46.95
50	-37.05	-53.62	-38.99	-33.22	-38.59	-35.34	-40.25	-34.80	-36.98	-47.42	-43.84	-45.69	-49.05	-44.21	-45.81	-50.53	-56.92	-61.68
70	-48.41	-48.21	-46.65	-37.76	-46.57	-44.66	-37.46	-50.99	-42.66	-48.39	-44.43	-45.75	-58.21	-51.74	-51.65	-53.56	-56.35	-54.70
80	-53.85	-51.44	-48.96	-43.14	-37.09	-44.71	-37.22	-41.94	-42.41	-43.81	-55.21	-42.03	-51.67	-50.92	-55.86	-56.22	-66.26	-60.74
90	-67.00	-62.22	-45.80	-41.90	-42.76	-39.75	-44.05	-45.36	-41.85	-46.43	-56.86	-47.52	-74.74	-54.73	-71.95	-58.34	-58.18	-50.20
100	-71.48	-62.66	-55.62	-42.91	-48.20	-43.37	-41.32	-40.35	-42.98	-49.55	-49.87	-52.20	-52.44	-46.05	-52.75	-59.49	-59.44	-58.91
110	-71.39	-63.25	-59.02	-55.99	-43.49	-48.24	-39.95	-44.29	-41.70	-52.04	-49.57	-46.88	-51.80	-52.33	-49.06	-53.56	-59.86	-63.01
120	-82.03	-66.47	-57.63	-56.39	-44.51	-43.85	-42.42	-41.39	-44.50	-45.01	-48.94	-47.88	-52.04	-52.47	-51.85	-53.15	-66.64	-54.70
130	-78.15	-72.70	-61.52	-59.38	-47.16	-48.48	-53.92	-43.12	-42.96	-46.58	-50.32	-47.03	-53.64	-51.43	-54.14	-59.49	-63.29	-56.01
140	-83.74	-77.96	-65.27	-57.40	-55.81	-47.86	-48.15	-44.04	-44.55	-45.86	-51.88	-48.01	-55.59	-54.75	-58.06	-57.81	-60.25	-57.75
150	-83.90	-74.07	-65.87	-55.04	-51.16	-47.62	-48.77	-46.36	-47.51	-46.60	-49.06	-47.08	-54.04	-51.64	-58.24	-56.12	-57.13	-64.00
160	-83.36	-80.56	-67.56	-59.54	-49.49	-48.12	-49.15	-46.76	-45.28	-51.55	-48.28	-45.72	-53.18	-49.80	-55.58	-61.83	-58.66	-57.28
170	-84.43	-86.00	-69.57	-66.17	-51.34	-49.14	-48.60	-45.12	-44.94	-49.32	-50.37	-49.11	-52.40	-51.55	-55.19	-59.66	-63.65	-58.34
180	-88.55	-83.52	-73.59	-71.27	-51.89	-51.40	-47.34	-48.47	-45.82	-50.02	-51.25	-49.07	-53.88	-52.05	-63.03	-56.64	-63.13	-56.88
190	-86.83	-87.55	-78.42	-65.44	-56.53	-53.43	-45.78	-49.29	-47.26	-50.41	-48.66	-47.98	-54.43	-51.68	-55.56	-58.83	-65.83	-58.14
200	-82.54	-85.92	-74.96	-64.43	-61.27	-54.55	-48.60	-50.56	-50.12	-54.76	-51.76	-48.34	-55.19	-52.24	-54.51	-58.61	-64.82	-66.09

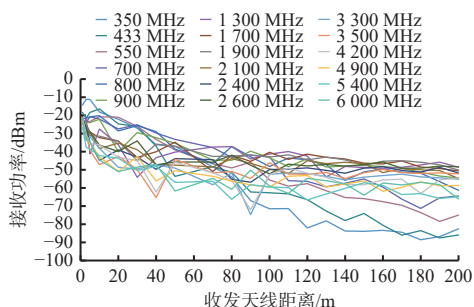


图 10 辅运大巷 2 中不同频率和距离下无线传输接收功率曲线

Fig. 10 Received power curve of wireless transmission at different frequencies and distances in auxiliary transport roadway 2

为了便于分析,将辅运大巷 2 中距发射天线前 200 m 的无线传输接收功率数据按不同频率取平均值,得到辅运大巷 2 中不同频率下无线传输平均接收功率,见表 10。

表 10 辅运大巷 2 中不同频率下无线传输平均接收功率

Table 10 Average received power of wireless transmissions at different frequencies in auxiliary transport roadway 2

频率/MHz	无线传输平均 接收功率/dBm	频率/MHz	无线传输平均 接收功率/dBm
350	-56.50	2 100	-44.05
433	-55.39	2 400	-45.93
550	-49.11	2 600	-43.04
700	-44.67	3 300	-49.73
800	-40.61	3 500	-48.34
900	-40.76	4 200	-50.37
1 300	-41.93	4 900	-51.61
1 700	-40.98	5 400	-54.88
1 900	-40.40	6 000	-52.62

由表 9、表 10 和图 10 可知,在 350 MHz~6 GHz

频段内,辅运大巷2中800 MHz~1900 MHz频段的无线传输平均接收功率最大,700 MHz~2 600 MHz频段的无线传输平均接收功率较大;辅运大巷2中的无线传输平均接收功率最大值为-40.40 dBm(对应频率为1900 MHz);在800 MHz~1 900 MHz频段的无线传输平均接收功率为-40.94 dBm,在700 MHz~2 600 MHz频段的无线传输平均接收功率为-42.49 dBm。因此,在辅运大巷2中矿用无线通信系统的工作频段应优选800 MHz~1 900 MHz或700 MHz~2 600 MHz。

综合考虑辅运大巷1、辅运大巷2、巷道拐弯和

分支的无线传输衰减,辅助运输大巷中矿用无线通信系统的工作频段应优选700 MHz~900 MHz。

7 掘进巷道无线传输测试分析及优选工作频段

发射设备及发射天线固定不动,收发天线均置于掘进巷道断面中央,设置便携式射频信号发生器的输出功率为+13 dBm。将接收天线分别置于距离发射天线1, 3, 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 m处,测试不同频率和距离下无线传输接收功率,数据见表11,曲线如图11所示。

表 11 掘进巷道中不同频率和距离下无线传输接收功率数据

Table 11 Received power data of wireless transmission at different frequencies and distances in an excavation roadway

收发 天线 距离/m	无线传输接收功率/dBm															
	350 MHz	433 MHz	550 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1 300 MHz	1 700 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	2 400 MHz	2 600 MHz	3 300 MHz	3 500 MHz	4 200 MHz	4 900 MHz
1	-14.32	-13.64	-29.77	-23.69	-17.12	-24.24	-25.01	-25.04	-24.35	-25.56	-21.40	-23.48	-19.54	-19.69	-17.91	-18.05
3	-13.31	-15.30	-23.42	-23.89	-20.65	-24.63	-22.59	-23.41	-22.02	-23.84	-35.26	-28.72	-34.79	-30.16	-29.14	-31.23
5	-14.78	-18.64	-21.32	-24.17	-18.80	-28.86	-22.77	-31.07	-25.65	-31.80	-32.94	-28.89	-33.42	-32.05	-34.10	-35.49
10	-14.77	-17.52	-25.22	-21.16	-20.72	-26.98	-27.91	-46.25	-26.93	-30.94	-36.96	-33.42	-37.86	-38.99	-34.88	-39.32
20	-18.21	-19.64	-26.50	-21.22	-43.48	-28.84	-37.83	-36.00	-41.75	-41.30	-43.33	-36.66	-40.50	-46.12	-54.53	-44.77
40	-31.98	-20.34	-31.83	-32.84	-48.24	-38.62	-37.69	-35.95	-49.67	-50.60	-49.04	-44.78	-46.20	-43.15	-47.94	-52.26
60	-37.87	-30.51	-36.67	-28.73	-28.56	-38.05	-44.76	-32.88	-40.29	-43.00	-41.42	-42.11	-61.25	-63.79	-60.30	-48.24
80	-55.84	-41.48	-42.97	-32.94	-37.83	-36.35	-52.79	-40.49	-40.25	-44.74	-54.49	-48.90	-57.90	-49.97	-67.96	-56.11
100	-65.57	-46.48	-45.27	-39.32	-45.96	-42.74	-56.50	-48.13	-49.79	-46.71	-53.90	-46.36	-54.52	-53.27	-54.37	-67.14
120	-65.76	-53.59	-48.69	-41.56	-40.54	-39.10	-52.04	-51.09	-55.91	-59.91	-61.86	-50.61	-63.75	-60.35	-73.41	-57.30
140	-75.46	-53.26	-51.13	-39.21	-38.12	-43.48	-63.10	-67.30	-52.82	-57.01	-68.86	-58.60	-59.22	-49.77	-67.63	-70.56
160	-81.27	-56.43	-53.68	-42.65	-42.49	-47.51	-45.37	-53.65	-54.75	-53.17	-64.95	-62.07	-56.58	-51.39	-58.49	-60.48
180	-80.30	-65.60	-54.97	-47.23	-46.77	-44.64	-43.63	-43.86	-49.17	-53.22	-53.81	-53.83	-55.88	-65.31	-58.07	-58.71
200	-84.75	-74.78	-57.04	-45.96	-49.66	-49.90	-46.76	-58.65	-47.33	-59.30	-58.41	-56.42	-59.42	-59.86	-59.29	-60.80
250	-93.94	-83.46	-66.01	-52.53	-52.73	-58.50	-58.45	-58.71	-58.60	-60.79	-63.02	-59.11	-57.62	-59.28	-72.98	-69.16
300	-97.02	-95.52	-75.08	-57.01	-55.67	-57.49	-55.28	-57.72	-53.45	-58.45	-59.87	-53.58	-58.67	-62.76	-74.47	-66.66
350	-95.53	-100.33	-83.01	-64.47	-59.15	-60.35	-57.85	-57.29	-56.31	-55.93	-60.08	-66.81	-63.54	-59.53	-67.18	-72.27
400	-95.46	-100.98	-93.89	-69.26	-62.64	-63.31	-60.43	-61.53	-60.96	-66.34	-70.60	-71.80	-64.42	-65.07	-72.81	-74.50
450	-96.19	-99.01	-95.77	-76.39	-67.08	-66.13	-62.82	-61.24	-60.81	-71.64	-77.96	-64.77	-65.49	-64.66	-70.69	-73.70
500	-95.11	-101.17	-99.95	-83.76	-80.35	-78.76	-73.08	-64.32	-69.74	-78.78	-81.82	-81.40	-76.22	-76.48	-76.35	-85.81

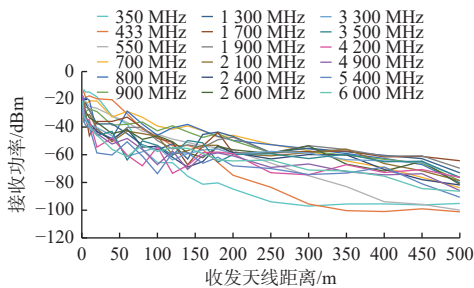


图 11 掘进巷道中不同频率和距离下无线传输接收功率曲线
Fig. 11 Received power curve of wireless transmission at different frequencies and distances in an excavation roadway

为便于分析,将掘进巷道中距发射天线前500 m的无线传输接收功率数据按不同频率取平均值,得到掘进巷道中不同频率下无线传输平均接收功率,见表12。

由表11、表12和图11可知,在350 MHz~6 GHz频段,掘进巷道在700 MHz~900 MHz频段的无线传输平均接收功率最大,掘进巷道中的无线传输平均接收功率最大值为-43.40 dBm(对应频率为700 MHz),在700 MHz~900 MHz频段的无线传输平均接收功

表 12 掘进巷道中不同频率下无线传输平均接收功率
Table 12 Average received power of wireless transmission at different frequencies in an excavation roadway

频率/MHz	无线传输平均接收功率/dBm	频率/MHz	无线传输平均接收功率/dBm
350	-61.37	2 100	-50.65
433	-55.38	2 400	-54.50
550	-53.11	2 600	-50.62
700	-43.40	3 300	-53.34
800	-43.83	3 500	-52.58
900	-44.92	4 200	-57.62
1 300	-47.33	4 900	-57.13
1 700	-47.73	5 400	-60.66
1 900	-47.03	6 000	-57.60

表 13 综采工作面中不同频率和距离下无线传输接收功率数据

Table 13 Received power data of wireless transmission at different frequencies and distances in fully mechanized mining face

收发 天线 距离/m	350 MHz	433 MHz	550 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1 300 MHz	1 700 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	2 400 MHz	2 600 MHz	3 300 MHz	3 500 MHz	4 200 MHz	4 900 MHz	5 400 MHz	6 000 MHz
7.00	-20.06	-22.84	-21.70	-22.88	-22.46	-21.56	-22.73	-26.05	-23.36	-26.55	-29.82	-23.37	-37.15	-30.41	-35.91	-38.40	-41.09	-39.90
59.50	-51.86	-47.86	-49.91	-49.00	-55.39	-54.67	-52.76	-63.12	-61.29	-53.55	-58.16	-71.53	-70.60	-49.87	-53.92	-57.74	-68.58	-56.91
71.75	-59.22	-54.54	-53.92	-51.17	-49.17	-52.92	-52.72	-65.82	-54.65	-56.78	-65.57	-65.34	-76.44	-65.57	-70.51	-64.95	-61.60	-59.20
98.00	-69.49	-73.47	-63.20	-67.66	-64.41	-68.03	-65.03	-65.25	-63.10	-68.94	-64.87	-62.20	-65.38	-63.63	-72.63	-78.02	-79.40	-67.00

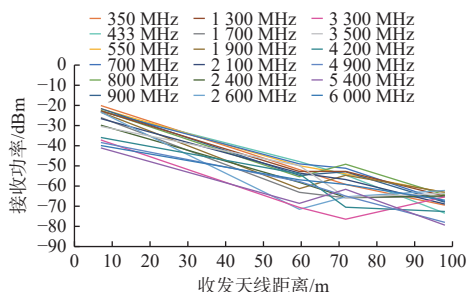


图 12 综采工作面中不同频率和距离下无线传输接收功率曲线
Fig. 12 Received power curve of wireless transmission at different frequencies and distances in fully mechanized mining face

表 14 综采工作面中不同频率下无线传输平均接收功率
Table 14 Average received power of wireless transmission at different frequencies in fully mechanized mining face

频率/MHz	无线传输平均接收功率/dBm	频率/MHz	无线传输平均接收功率/dBm
350	-50.16	2 100	-51.46
433	-49.68	2 400	-54.61
550	-47.18	2 600	-55.61
700	-47.68	3 300	-62.39
800	-47.86	3 500	-52.37
900	-49.30	4 200	-58.24
1 300	-48.31	4 900	-59.78
1 700	-55.06	5 400	-62.67
1 900	-50.60	6 000	-55.75

率为-44.05 dBm。因此,在掘进巷道中矿用无线通信系统的工作频段应优选 700 MHz~900 MHz。

8 综采工作面无线传输测试分析及优选工作频段

将收发天线置于距煤壁 2.8 m、距液压支架立柱底部 0.6 m、距综采工作面底部 0.85 m 的位置,将便携式射频信号发生器的输出功率设置为+13 dBm。接收天线分别置于距发射天线 7.00, 59.50, 71.75, 98.00 m 处,测试不同频率和距离下无线传输接收功率,数据见表 13,曲线如图 12 所示。

为便于分析,将综采工作面中距发射天线前 98 m 的无线传输接收功率数据按不同频率取平均值,得到综采工作面中不同频率下无线传输平均接收功率,见表 14。

由表 13、表 14 和图 12 可知,在 350 MHz~6 GHz 频段内,综采工作面在 433 MHz~1 300 MHz 频段的无线传输平均接收功率最大,综采工作面中的无线传输平均接收功率最大值为-47.18 dBm(对应频率为 550 MHz),在 433 MHz~1 300 MHz 频段的无线传输平均接收功率为-48.34 dBm。因此,在综采工作面中矿用无线通信系统的工作频段应优选 433 MHz~1 300 MHz。

9 结论

1) 拐弯巷道中频率越低,无线传输衰减越小,其中 350 MHz~900 MHz 频段的无线传输衰减最小,矿用无线通信系统的工作频段应优选 350 MHz~900 MHz。

2) 分支巷道中频率越低,无线传输衰减越小,其中 350 MHz~900 MHz 频段的无线传输衰减最小,矿用无线通信系统的工作频段应优选 350 MHz~900 MHz。

3) 辅助运输大巷中 700 MHz~900 MHz 频段的无线传输衰减最小,矿用无线通信系统的工作频段应优选 700 MHz~900 MHz。

4) 掘进巷道中 700 MHz~900 MHz 频段的无线

传输衰减最小, 矿用无线通信系统的工作频段应优选 700 MHz~900 MHz。

5) 综采工作面中 433 MHz~1 300 MHz 频段的无线传输衰减最小, 矿用无线通信系统的工作频段应优选 433 MHz~1 300 MHz。

6) 综合考虑拐弯巷道、分支巷道、辅助运输大巷、掘进工作面、综采工作面的无线传输衰减, 矿用无线通信系统的工作频段应优选 700 MHz~900 MHz。

7) 在巷道断面相同的情况下, 拐弯巷道中的无线传输衰减小于分支巷道; 支巷发射的分支巷道中的无线传输衰减小于主巷发射的分支巷道。巷道拐弯和分支均增加了无线传输衰减。为减小巷道拐弯和分支对无线传输的影响, 无线通信基站和定位分站及其天线应设置在拐弯巷道的拐点和分支巷道的分支点。

8) 研究成果已被中华人民共和国能源行业标准 NB/T 11546—2024《煤矿用 5G 通信系统通用技术条件》、NB/T 11523—2024《煤矿用 5G 通信基站》和 NB/T 11547—2024《煤矿用 5G 通信基站控制器》应用。

参考文献(References):

- [1] 孙继平. 煤矿用 5G 通信系统标准研究制定[J]. 工矿自动化, 2023, 49(8): 1-8.
SUN Jiping. Research and development of 5G communication system standards for coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(8): 1-8.
- [2] 孙继平, 彭铭. 煤矿信息综合承载网标准研究制定[J]. 工矿自动化, 2024, 50(4): 1-8.
SUN Jiping, PENG Ming. Research and formulation of coal mine information comprehensive bearer network standards[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(4): 1-8.
- [3] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G 和网络硬切片技术[J]. 工矿自动化, 2021, 47(8): 1-6.
SUN Jiping. Coal mine intelligence, mine 5G and network hard slicing technology[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(8): 1-6.
- [4] 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.
- [5] GB/T 3836.1—2021 爆炸性环境 第 1 部分: 设备 通用要求[S].
GB/T 3836.1-2021 Explosive atmospheres-Part 1: Equipment-General requirements[S].
- [6] 孙继平, 彭铭. 无线电波发射功率防爆要求与检测方法[J]. 工矿自动化, 2024, 50(6): 1-5, 22.
SUN Jiping, PENG Ming. Explosion proof requirements and detecting methods for radio wave transmission power[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(6): 1-5, 22.
- [7] 孙继平, 彭铭. 矿井无线电波防爆安全发射功率研究[J]. 工矿自动化, 2024, 50(3): 1-5.
SUN Jiping, PENG Ming. Research on the safe transmission power of mine radio wave explosion prevention[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(3): 1-5.
- [8] 孙继平, 彭铭, 潘涛, 等. 无线电波防爆安全阈值研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(2): 1-5.
SUN Jiping, PENG Ming, PAN Tao, et al. Research on the safety threshold of radio wave explosion-proof[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(2): 1-5.
- [9] 梁伟锋, 孙继平, 彭铭, 等. 煤矿井下无线电波防爆安全功率阈值研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(12): 123-128, 163.
LIANG Weifeng, SUN Jiping, PENG Ming, et al. Research on safe power threshold of radio wave explosion-proof in coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 123-128, 163.
- [10] 丁序海, 潘涛, 彭铭, 等. 煤矿井下无线电波对人体的影响[J]. 工矿自动化, 2022, 48(11): 84-92, 144.
DING Xuhai, PAN Tao, PENG Ming, et al. Influence of underground radio wave on human body in coal mine[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(11): 84-92, 144.
- [11] 潘涛, 彭铭, 徐会军, 等. 煤矿井下无线电波防爆安全阈值及测试方法[J]. 智能矿山, 2023, 4(1): 78-82.
PAN Tao, PENG Ming, XU Huijun, et al. Safety thresholds and test methods for radio wave explosion protection in underground coal mines[J]. Journal of Intelligent Mine, 2023, 4(1): 78-82.
- [12] 邵水才, 郭旭东, 彭铭, 等. 煤矿井下无线传输分析方法[J]. 工矿自动化, 2022, 48(10): 123-128.
SHAO Shucai, GUO Xudong, PENG Ming, et al. Coal mine underground wireless transmission analysis method[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(10): 123-128.
- [13] 孙继平, 江赢. 矿井车辆无人驾驶关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(5): 1-5, 31.
SUN Jiping, JIANG Ying. Research on key technologies of mine unmanned vehicle[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(5): 1-5, 31.
- [14] 孙继平, 梁伟锋, 彭铭, 等. 煤矿井下无线传输衰减分析测试与最佳工作频段研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(4): 1-8.
SUN Jiping, LIANG Weifeng, PENG Ming, et al. Analysis and testing of wireless transmission attenuation in coal mine underground and research on the optimal operating frequency band[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 1-8.

(下转第 20 页)

- [10] 程传奇, 郝向阳, 李建胜, 等. 融合改进 A*算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 137-143.
CHENG Chuanqi, HAO Xiangyang, LI Jiansheng, et al. Global dynamic path planning based on fusion of improved A* algorithm and dynamic window approach[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 137-143.
- [11] RICHTER C, ROY N. Learning to plan for visibility in navigation of unknown environments[C]. International Symposium on Experimental Robotics, Tokyo, 2016: 387-398.
- [12] OLEJNIKOVA H, TAYLOR Z, SIEGWART R, et al. Safe local exploration for replanning in cluttered unknown environments for microaerial vehicles[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(3): 1474-1481.
- [13] 黄迎港, 陈锴, 罗文广. 复杂环境下无人机全覆盖路径规划混合算法研究[J]. 广西科技大学学报, 2022, 33(1): 85-93.
HUANG Yinggang, CHEN Kai, LUO Wenguang. Hybrid algorithm of UAV full coverage path planning in complex environment[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2022, 33(1): 85-93.
- [14] 袁晓明, 郝明锐. 煤矿辅助运输机器人关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 8-14.
YUAN Xiaoming, HAO Mingrui. Research on key technologies of coal mine auxiliary transportation robot[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 8-14.
- [15] 黄友锐, 李静, 韩涛, 等. 基于膜计算的煤矿井下机器人路径规划算法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(11): 22-29.
HUANG Yourui, LI Jing, HAN Tao, et al. Research on path planning algorithm of robot in coal mine based on membrane computing[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(11): 22-29.
- [16] 薛光辉, 王梓杰, 王一凡, 等. 基于改进人工势场算法的煤矿井下机器人路径规划[J]. 工矿自动化, 2024, 50(5): 6-13.
XUE Guanghui, WANG Zijie, WANG Yifan, et al. Path planning of coal mine underground robot based on improved artificial potential field algorithm[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(5): 6-13.
- [17] 夏静慧, 肖战定, 霍亚超, 等. 一种改进人工势场的矿车避障路径规划方法[J]. 能源与环保, 2024, 46(5): 196-201.
XIA Jinghui, XIAO Zhanding, HUO Yachao, et al. An obstacle avoidance path planning method for mine cars with improved artificial potential field[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(5): 196-201.
- [18] 黄荣杰, 王亚刚. 基于可视图与改进遗传算法的机器人平滑路径规划[J]. 控制工程, 2024, 31(4): 678-686.
HUANG Rongjie, WANG Yagang. Smooth path planning for robot based on visibility graph and improved genetic algorithm[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(4): 678-686.
- [19] 范晓临, 张旭东, 邹渊, 等. 一种基于简化可视图的建图和规划方法[J]. 汽车工程, 2024, 46(7): 1249-1258.
FAN Xiaolin, ZHANG Xudong, ZOU Yuan, et al. A mapping and planning method based on simplified visibility graph[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(7): 1249-1258.
- [20] BOTE A, MÜLLER M, SCHAEFFER J. Near optimal hierarchical path-finding[J]. Journal of Game Development, 2004, 1: 1-30.
- [21] 张琦, 马家辰, 马立勇. 基于简化可视图的环境建模方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(10): 1383-1386, 1391.
ZHANG Qi, MA Jiachen, MA Liyong. Environment modeling approach based on simplified visibility graph[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2013, 34(10): 1383-1386, 1391.

(上接第 11 页)

- [15] 孙继平, 张高敏. 矿用 5G 频段选择及天线优化设置研究[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 1-7.
SUN Jiping, ZHANG Gaomin. Research on 5G frequency band selection and antenna optimization setting in coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 1-7.
- [16] 孙继平, 张高敏. 矿井应急通信系统[J]. 工矿自动化, 2019, 45(8): 1-5.
SUN Jiping, ZHANG Gaomin. Mine emergency communication system[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(8): 1-5.
- [17] 孙继平. 矿井人员位置监测技术[J]. 工矿自动化, 2023, 49(6): 41-47.
SUN Jiping. Mine personnel position monitoring technology[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 41-47.
- [18] 孙继平, 陈晖升. 智慧矿山与 5G 和 WiFi6[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 1-4.
SUN Jiping, CHEN Huisheng. Smart mine with 5G and WiFi6[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 1-4.
- [19] 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].
- [20] NB/T 11523—2024 煤矿用 5G 通信基站[S].
NB/T 11523-2024 5G communication base station for coal mines[S].
- [21] NB/T 11547—2024 煤矿用 5G 通信基站控制器[S].
NB/T 11547-2024 5G communication baseband controller for coal mines[S].