矿山井下矩形巷道电磁波传输特性研究*

赵新杰[1],张涛[2],闫魏锋[3],冯向军[3],张英[1],孙斌[1],绳先闯[1]

(1.西安科技大学 信息与通信工程学院, 陕西 西安 710600;
2.西安科技大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710600;
3.榆林天地煤机装备有限公司, 陕西 榆林市 719000)

摘要:为优化矿井无线通信系统天线布局,采用入射及反弹射线法(Shooting and Bouncing Ray tracing, SBR)构建宽5 m、高3.4 m的矩形巷道三维模型,从传输距离、纵向切面和空间分布多尺度系统分析0.9 GHz、2.4 GHz和3.5 GHz频段在巷道内的功率衰减特性,并研究天线位置对无线传输的影响。结果显示:0.9 GHz频段传输特性优于其他两个频段,不同传输距离的纵向切面功率均值较2.4 GHz和3.5 GHz分别高出6.60～9.17 dBm和10.49～12.63 dBm;天线最佳水平位置为距巷壁0.01～0.1 m,当天线紧贴巷壁(距巷壁小于0.01 m)部署时,功率空间分布呈非对称特性,发射天线同侧邻壁区的接收功率比对侧高1～4 dBm;收发天线高度差小于0.5 m时可获得稳定且较强的接收信号。研究结果可为优化巷道中基站设置和天线布局提供参考,有助于推动矿山智能化通信系统的开发和建设。

关键词:矿井巷道;电磁波传播;入射及反弹射线法;工作频率;天线位置

中图分类号:TD655 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0244-11

Study on Electromagnetic Wave Propagation Characteristics in Rectangular Roadways of Underground Mines

ZHAO Xinjie[1], *ZHANG Tao*[2], *YAN Weifeng*[3], *FENG Xiangjun*[3], *ZHANG Ying*[1], *SUN Bin*[1], *SHENG Xianchuang*[1]

(1.College of Communication and Information Engineering,
Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710600, China;
2.College of Materials Science and Engineering,
Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710600, China;
3.Yulin Tiandi Coal Machinery Equipment Company, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: To optimize the antenna layout for mine wireless communication systems, a 3D model of a rectangular roadway measuring 5 m in width and 3.4 m in height was constructed using the Shooting and Bouncing Ray tracing (SBR) method. A multi-scale analysis of power attenuation characteristics in the 0.9 GHz, 2.4 GHz, and 3.5 GHz frequency bands within roadways was conducted across transmission distance, longitudinal cross-section, and spatial distribution. The impact of antenna positioning on wireless transmission was also investigated. The results show that the 0.9 GHz frequency band exhibits superior transmission characteristics compared to the other two bands. The mean longitudinal cross-sectional power at different transmission distances is 6.60-9.17 dBm and 10.49-12.63 dBm higher than that for 2.4 GHz and 3.5 GHz, respectively. The optimum horizontal position for the antenna is within 0.01 to 0.1 m from the roadway wall. When the antenna was deployed flush against the wall (within 0.01 m of the wall), the spatial power distribution exhibites an asymmetric characteristic. The received power in the adjacent wall area on the same side as the transmitting antenna is 1 to 4 dBm higher than on the opposite side. A stable and strong reception signal can be obtained when the height difference between the transmitting and receiving antennas is less than 0.5 m. The research findings may serve as a reference for optimizing base station placement and antenna layout within roadways, thereby facilitating the development and construction of intelligent communication systems for mining operations.

Key words: Mine roadway, Electromagnetic wave propagation, Shooting and Bouncing Ray tracing method, Operating frequency, Antenna position

---

* **收稿日期**:2025-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52174151,12474468,12075189);陕西省联合基金重点项目(2021JML-05);榆林市科技计划项目(2024-CXY-165);陕西省教育厅科技计划重点项目(24JR112)

作者简介:赵新杰(2000—),女,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为矿井无线通信。E-mail:2633342763@qq.com

通信作者:张涛(1977—),男,山东荣成人,教授,博士生导师,研究方向为智慧矿山。E-mail:tzhang@xust.edu.cn

0　引言

采矿业作为现代经济的重要基础产业，在5G通信、人工智能等新一代信息技术的驱动下，正加速推进数字化、智能化转型升级[1-2]，智慧矿山建设已成为全球采矿业的必然发展趋势[3-4]。当前，我国矿山无线通信技术正处于4G向5G的过渡阶段[5]，巷道是无线信号传输受限的特殊空间，地面通信系统和开放空间电磁波传播理论无法直接应用于矿山巷道[6]。而且，目前几乎没有专门针对矿山特殊环境建立的电磁波传播衰减统计模型[7]。因此，研究矿山巷道受限环境中无线传输特性及其影响因素，对优化5G、WiFi6、UWB、ZigBee[8]等通信系统的基站布置，实现有效、可靠的电磁波覆盖至关重要。巷道无线传播特性的研究可采用射线追踪技术、波导分析、基于实测的经验建模、数值模拟以及混合方法等多种技术手段[9]。QIAN等[10]通过将波模理论与SBR方法相结合，计算了隧道曲率在远场区域引入的额外损耗；LI等[11]采用射线追踪法研究了700 MHz无线信号在巷道中的传输特性，建立了巷道模型，增加了巷道垂直尺寸的计算；JI等[12]结合巷道壁的粗糙度损失和倾斜损失提出了一种新的混合多模波导模型；ZHAO等[13]研究了天线增益、天线位置、隧道截面形状和波束角对开放封闭混合空间中无线电波覆盖的影响；YOU等[14]提出了一种改进的射线追踪方法，综合考虑天线类型、位置、频段等因素，针对隧道直线段和曲线段进行场强计算；ZHOU等[15]通过试验测量，定量分析了垂直极化、水平极化及交叉极化信号在矿井环境中的传播差异；ZHAI等[16]基于射线追踪技术，分析了弯曲巷道曲率半径和工作频率对电磁波传输特性的影响。为保障通行，实际天线通常安装在顶板或侧壁，但现有研究多假设天线位于巷道断面中心[17-18]，与实际情况存在偏差。本文通过引入入射及反弹射线法(Shooting and Bouncing Raytracing，SBR)，计算井下常用工作频段(0.9 GHz、2.4 GHz和3.5 GHz)下宽5 m高3.4 m巷道中电磁波传输情况，分析天线在巷道断面最佳位置，以期为优化井下无线通信系统天线部署提供参考。

1　基本原理

1.1　电磁波传播区域划分

当自由空间中的电磁波传播特性与光线相似时，可将其视为射线，采用几何光学法(Geometrical Optics，GO)预测其传播行为[19]。由于自由空间不存在电磁介质，电磁波传播速度接近光速，仅受到真空物理常数限制，不会发生反射、衍射或折射等现象，点源均匀地向四周辐射能量，任意位置处的接收功率 P_r 可通过弗林斯传输方程(Friis Transmission Equation)得到：

$$P_r=\frac{P_tG_tG_r\lambda^2}{(4\pi)^2d^2L} \tag{1}$$

式中：P_t是发射天线功率；G_t是发射天线增益系数；G_r为接收天线增益系数；λ 为载波波长；d 为收发天线间的距离；L 是系统损耗因子。

G_t和G_r的表达式如下：

$$G_t=\frac{4\pi S_t}{\lambda^2} \tag{2}$$

$$G_r=\frac{4\pi S_r}{\lambda^2} \tag{3}$$

式中：S_t为发射天线有效面积；S_r为接收天线的有效面积。

自由空间中电磁波的衰减程度可以用发射功率与接收功率的比值来表示。实际通信工程中，电磁波衰减程度通常由自由空间的传播损耗来表征。发射天线和接收天线的增益系数均为1时，可得到传输损耗 P_L：

$$P_L=20\lg d+20\lg f-10\lg\left[\frac{c^2}{(4\pi)^2}\right] \tag{4}$$

式中：f 为载波频率，Hz；c 为真空中光速，大小为 3×10^8 m/s。

电磁波在巷道受限空间中的传播可根据收发天线距离划分为近场区、远场区和极远区。在近场区，收发天线距离较近，电磁波遵循自由空间传播规律，随着距离增加，反射波出现并伴随大量高次模，进入多模态传播区。在远场区，接收天线除直射信号外，还会接收到大量反射信号，此时高次模显著衰减，传播主要依赖基模，进入波导传播区。当传播距离达到极远区时，电磁波传播可近似为远距离自由空间传播[20]。

1.2　入射及反弹射线法

SBR算法结合了几何光学法和物理光学法(Physical Optics，PO)的优点，能有效处理电磁波传播过程中的多次反射现象[21]，且易于将实际问题模型化，适用于矿山巷道复杂环境中的电波传播特性研究。计算过程主要分为3个部分：射线发射、射

线跟踪和射线接收,其算法流程如图 1 所示。

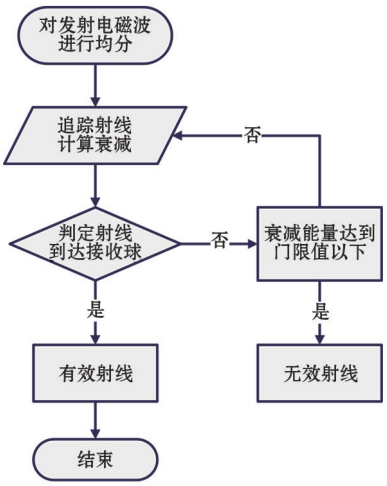


图 1 SBR 算法流程

Fig.1 Flow of the SBR algorithm

(1) 射线的发射。SBR 算法将发射天线抽象为均匀发射射线的点源,从点源 T_x 开始追踪每条射线的传播路径,以此模拟电磁波的传播行为。为提高射线分辨率,将发射电磁波的理想球面波前均匀划分为若干单元,每条射线均分电磁波能量,相邻单元之间无间隙且具有相同的立体角 $d\Omega$,波前划分如图 2 所示。

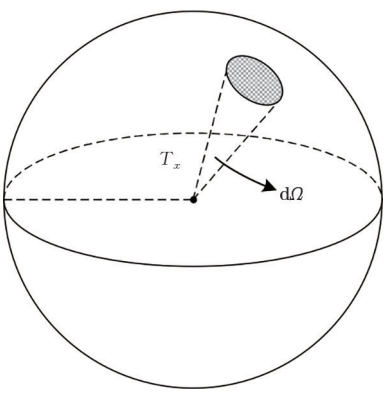


图 2 理想波前球示意

Fig.2 Schematic of an ideal wavefront sphere

(2) 射线的跟踪。SBR 通过射线追踪树来组织和管理整个追踪过程[22],涵盖直射、反射、绕射及相交面的电磁参数。每条射线的传播方向与多面体平面进行碰撞检测,若无碰撞,则为视距路径,直接计算接收场;若发生碰撞,则根据反射和折射定律生成新的反射射线和折射射线,并递归继续追踪。射线振幅通过反射系数和折射系数计算得出,新射线再次进行碰撞检测与处理,直至超过最大反射、折射次数或射线强度降至门限值以下,至此射线追踪过程结束。

(3) 射线的接收。在接收端 R_x 设置接收球区域,进入该区域的射线被记录为有效射线,未进入的射线则视为无效射线。有效射线的能量贡献通过矢量叠加计算,用于精确评估接收点的信号强度分布,无效射线则被排除在计算之外,在保证仿真精度的同时降低计算资源的消耗,接收球示意见图 3。

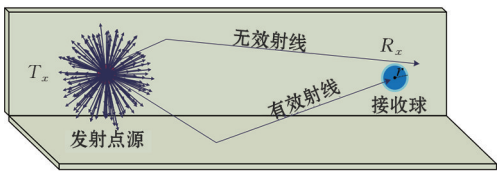


图 3 接收球示意

Fig.3 Schematic of the receiving ball

2 仿真分析与验证

2.1 模型构建与参数设置

为准确分析无线电波在矩形巷道中的传输特性,本研究综合考虑巷道建模的复杂性和环境属性,包括巷道几何形状、壁面结构及电磁参数,构建符合实际的矩形巷道三维模型。巷道类型为喷射混凝土运输大巷,巷道壁、顶板、底板均设置为混凝土材料,其相对介电常数为 7,电导率为 0.015 S/m。考虑到实际巷壁表面通常粗糙不平,为准确反映巷壁物理特性,选定模型粗糙度为巷壁常见粗糙度 0.3 cm。

井下天线发射功率受本质安全限制[23],基于长直矿井巷道结构,选择功率 0.2 W、增益 2 dBi 的垂直极化偶极子天线作为发射天线。其直角坐标系下的三维方向图中,x、y、z 轴分别对应巷道的宽、长、高方向,直观表征辐射能量空间分布特性,如图 4 所示。

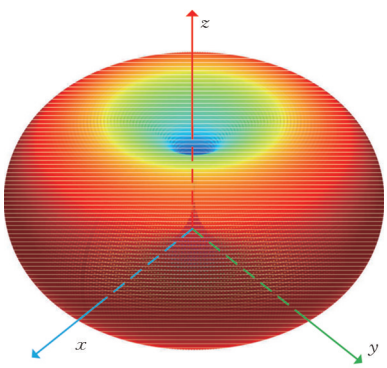


图 4 天线三维方向

Fig.4 Three-dimensional pattern of the antenna

本文以井下常用无线通信频段 0.9 GHz、2.4 GHz 和 3.5 GHz 为主要研究频段，结合实际巷道环境构建三维参数模型，包括天线相关参量、壁面材料电磁特性及粗糙度等关键因素，参量汇总见表 1。

表 1　仿真参数设置

Table 1　Simulation parameter setting

工作频率/GHz	极化方式	天线功率/W	天线增益/dBi	巷壁材料	电参数	粗糙度/cm
0.9、2.4、3.5	垂直极化	0.2	2	混凝土	相对介电常数为 7；电导率为 0.015	0.3

运用射线追踪法中的 SBR 算法对巷道环境下的电磁波覆盖特性进行仿真分析，通过模拟电磁波在巷道中的传播路径、反射、绕射及散射等效应，获取接收点的功率分布及信号强度特性，如图 5 所示。

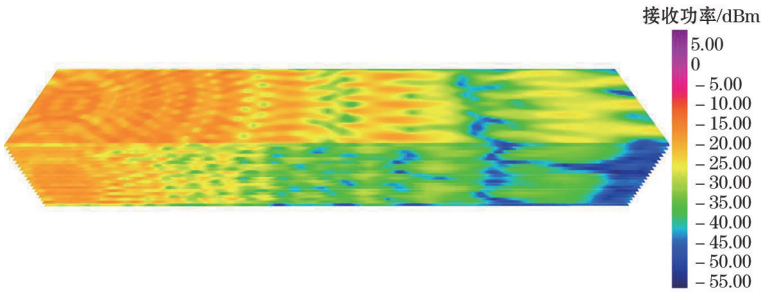


图 5　巷道环境仿真示意

Fig.5　Schematic of roadway environment simulation

2.2　工作频率的影响

在分析工作频率对巷道传输特性的影响时，发射天线水平位置为巷道中心，垂直高度设置为距地面 1.7 m 处。图 6 展示了巷道中 0.9 GHz、2.4 GHz 和 3.5 GHz 三种频段下接收功率的三维空间分布特性。

由图 6 可观察到，巷道内部功率呈对称分布特性。在近场区域，两侧壁的对称反射使直射波与多径反射波产生强烈相干叠加，形成密集且规律的干涉条纹；随着传播距离增加至远场，多径相干性减弱导致干涉条纹稀疏化，但功率分布仍保持对称特性。从传播机理来看，0.9 GHz 频段波长较长（$\lambda \approx 0.33$ m），在巷道中仅能激发少量低次模式，模式间干涉规律性强，在短距离内发生剧烈干涉和波动，随着传输距离的增大，随后进入稳定衰减阶段；2.4 GHz（$\lambda \approx 0.125$ m）可激发中等数量模式（约 5～7 种），初始阶段模式干涉较为复杂，在经历较长距离的复杂干涉和剧烈波动后才开始稳定衰减；而 3.5 GHz（$\lambda \approx 0.086$ m）可激发十余种高次模式，初始阶段表现出极其复杂的多模干涉效应，随着传播距离的增加，高次模式快速衰减，经过更长一段传输距离形成稳定衰落。0.9 GHz 频段下接收功率幅值维持在较高水平，2.4 GHz 频段次之，3.5 GHz 频段最低。在紧邻巷壁处，由于 2.4 GHz 和 3.5 GHz 波长较短，更易受到巷道边界反射影响，因此衰减更大，相比之下，0.9 GHz 展现出显著的传播优势，其空间分布均匀性和传播稳定性均优于其他两个频段。

图 7 至图 11 系统展示了巷道环境中 0.9 GHz、2.4 GHz 和 3.5 GHz 频段下接收功率空间分布特性，分别对应传输距离 2 m、10 m、30 m、60 m 和 100 m 处功率的纵向分布情况。

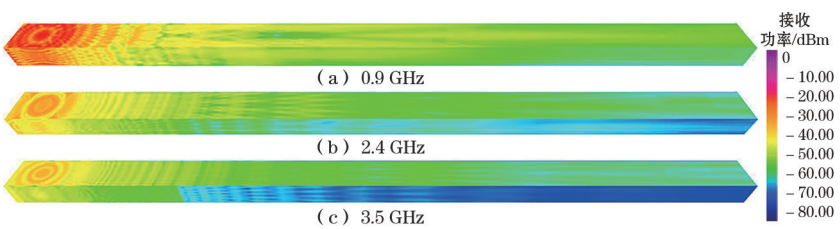
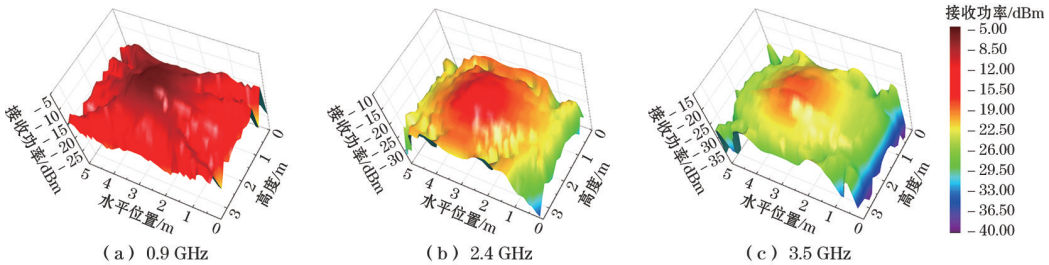


图 6　不同工作频段下接收功率三维分布

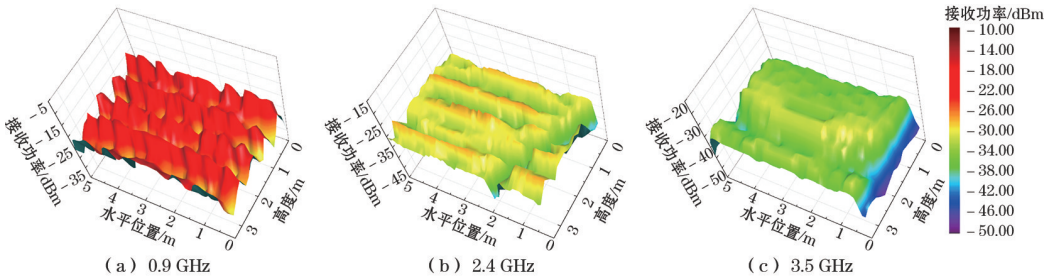
Fig.6　Three-dimensional distribution of received power in different operating frequency bands



(a) 0.9 GHz (b) 2.4 GHz (c) 3.5 GHz

图 7 传输距离 2 m 处接收功率纵向切面图

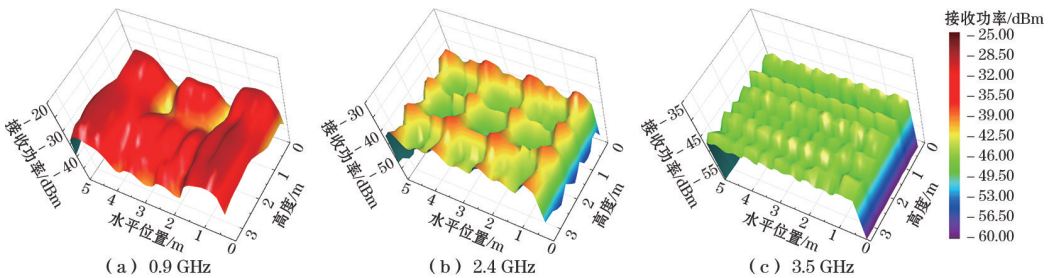
Fig.7 Longitudinal cross-sectional views of the received power at a transmission distance of 2 m



(a) 0.9 GHz (b) 2.4 GHz (c) 3.5 GHz

图 8 传输距离 10 m 处接收功率纵向切面图

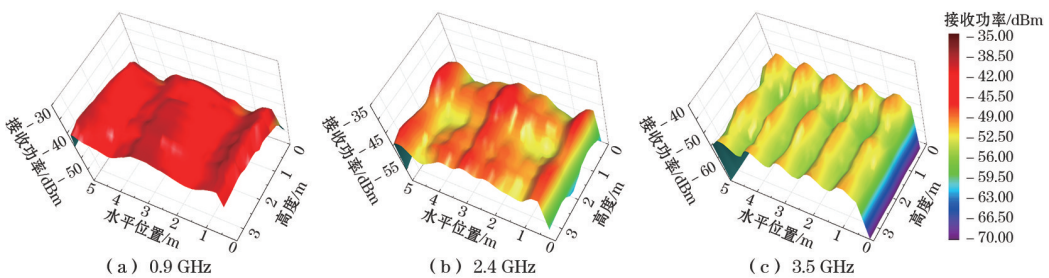
Fig.8 Longitudinal cross-sectional views of the received power at a transmission distance of 10 m



(a) 0.9 GHz (b) 2.4 GHz (c) 3.5 GHz

图 9 传输距离 30 m 处接收功率纵向切面图

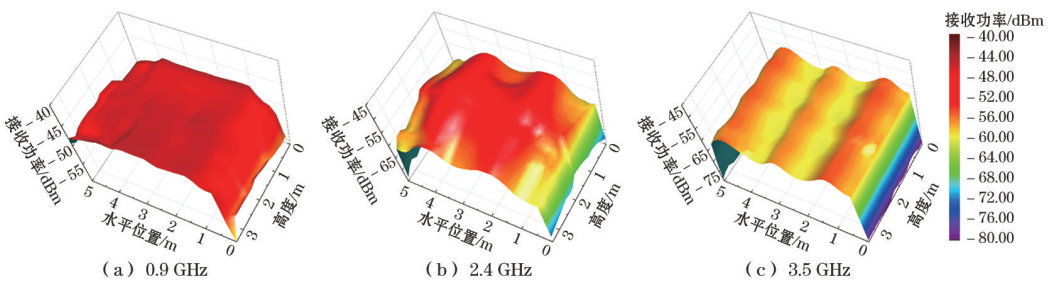
Fig.9 Longitudinal cross-sectional views of the received power at a transmission distance of 30 m



(a) 0.9 GHz (b) 2.4 GHz (c) 3.5 GHz

图 10 传输距离 60 m 处接收功率纵向切面图

Fig.10 Longitudinal cross-sectional views of the received power at a transmission distance of 60 m



(a) 0.9 GHz (b) 2.4 GHz (c) 3.5 GHz

图 11 传输距离 100 m 处接收功率纵向切面图

Fig.11 Longitudinal cross-sectional views of the received power at a transmission distance of 100 m

如图 7 所示，在传输距离 2 m 处，0.9 GHz、2.4 GHz 和 3.5 GHz 频段接收功率在巷道纵向切面均表现为中心幅值高，四周幅值低的分布特点。0.9 GHz 频段在巷道中心区域($1.7<x<3.4$，$1.0<y<2.3$)接收功率稳定在－6～－8 dBm，而在边缘区域功率衰减明显，紧邻巷壁处功率最低可达－20 dBm；2.4 GHz 频段在巷道中心区域($1.6<x<3.5$，$0.8<y<2.6$)功率为－15～－18 dBm，靠近巷壁的边界区域功率幅值为－19～－25 dBm，紧邻巷壁处功率最低可达－32 dBm；3.5 GHz 频段在中心区域($1.5<x<3.5$，$1.0<y<2.5$)功率为－17～－21 dBm，边界区域进一步衰减至－24～－32 dBm，巷壁处功率最低为－38 dBm。

由图 8 可知，传输距离 10 m 处，0.9 GHz 频段接收功率在巷道纵向切面呈规律波动，波动幅度约为±5 dBm，其中波峰约为－20 dBm，波谷约为－30 dBm；2.4 GHz 频段波动幅度约为±4 dBm，波峰约为－28 dBm，波谷约为－36 dBm，并在点(0，0)与点(1.5，3.4)连线处有明显凹陷带，凹陷处最低功率约为－38 dBm；3.5 GHz 频段呈不规律波动，其中区域($0.3<x<4.7$，$1.4<y<2.4$)功率值维持在－31～－32 dBm 范围，但在 2.5 m 高度附近出现明显衰落，最低约－40 dBm，紧邻左右巷壁处功率下降至－40～－44 dBm。

由图 9 可知，传输距离 30 m 处，3 种频段传播特性差异显著。0.9 GHz 频段表现为较大幅度不规律波动，区域($0.1<x<1.3$，$0.1<y<3.4$)与区域($3.7<x<4.9$，$0.1<y<3.4$)功率较高，维持在－28～－32 dBm，近巷壁 0.1 m 范围内功率降至－34～－40 dBm，而在特定区域($1.4<x<1.8$，$0.5<y<1.2$)和($3.2<x<3.6$，$0.5<y<1.2$)出现－40～－44 dBm 深度衰落；2.4 GHz 频段呈规律波动，波动幅度约±6 dBm，波峰、波谷分别约为－38 dBm、－48 dBm，紧邻巷壁功率衰减至－54 dBm；3.5 GHz 波动频率更高，波动幅度约±2 dBm，波峰、波谷处约为－44 dBm、－48 dBm，近巷壁区域衰减为－53～－60 dBm。

由图 10 可知，传输距离 60 m 处，0.9 GHz 频段功率分布表现为缓变特征，水平方向($0.2<x<1$、$2<x<3.2$、$4<x<4.9$，$0.2<y<3.4$)区域内，功率幅值处于－39～－44 dBm 的较高水平，垂直方向上，近地面区域($0<y<0.2$)功率衰减至约－50～－54 dBm；2.4 GHz 频段表现出非周期性波动，在($0.2<x<0.5$、$2.2<x<2.8$、$4<x<4.9$，$0.1<y<3.4$)区域功率相对较高，约为－45～－49 dBm，近巷壁 0.1 m 范围内功率衰减为－52～－60 dBm；3.5 GHz 频段则展现规律波动特性，波动幅度约±4 dBm，波峰和波谷分别约为－49 dBm 和－57 dBm，在贴近巷壁处功率最低衰减至－67 dBm。

由图 11 可知，传输距离 100 m 处，0.9 GHz 频段表现出良好的空间均匀性，在巷道主体区域($0.1<x<4.9$，$0<y<3.4$)功率稳定维持在－40～－48 dBm 范围，近左右巷壁区域最低衰减至－57 dBm；2.4 GHz 频段呈现双峰分布特征，中心区域两个波峰处功率约－49 dBm，而 4 个边角区域功率较低，为－55～－60 dBm，紧邻左右侧壁处最低衰减至－70 dBm；3.5 GHz 频段下整个切面呈现三峰两谷的规律分布，波动幅度约±2.5 dBm，其中波峰约－55 dBm，波谷约－60 dBm，贴近左右侧壁处功率最低衰减至 78 dBm。这一量化特征在表 2 的纵向切面功率数据中得到了体现。

表 2　巷道纵向切面接收功率数据分析

Table 2　Data analysis of received power in longitudinal section of roadway

工作频段/GHz	纵向切面位置/m	功率均值/dBm	功率最大值/dBm	功率最小值/dBm
0.9	2	－12.871	－6.011	－24.075
2.4	2	－20.722	－15.303	－34.389
3.5	2	－24.209	－17.948	－41.594
0.9	10	－23.581	－15.924	－36.899
2.4	10	－31.597	－27.198	－41.460
3.5	10	－35.036	－31.119	－48.194
0.9	30	－34.451	－28.710	－44.423
2.4	30	－43.617	－37.916	－57.085
3.5	30	－47.083	－43.895	－66.278
0.9	60	－43.509	－39.026	－55.017
2.4	60	－50.110	－45.486	－61.947
3.5	60	－53.999	－49.524	－75.710
0.9	100	－47.945	－45.004	－60.868
2.4	100	－54.955	－49.893	－72.644
3.5	100	－59.218	－54.859	－80.335

表 2 数据显示，在不同传输距离的巷道纵向切面内，0.9 GHz 频段的功率分布均值均显著高于 2.4 GHz 和 3.5 GHz 频段：在 2 m 处分别高出 7.85 dBm 和 11.34 dBm；在 10 m 处分别高出 8.02 dBm 和 11.46 dBm；在 30 m 处差异达 6.60 dBm 和 12.63 dBm；在 60 m 处保持 9.17 dBm 和 10.49 dBm 的优势；直至 100 m 处仍分别高出 7.01 dBm 和 11.27 dBm。这一现象主要源于不同频段电磁波在受限空间中的多径干扰效应差异，这与短波长导致的驻波

效应密切相关,0.9 GHz 频段较长的波长使其具有更强的绕射能力和更均匀的能量分布特性。

为观察接收功率随传输距离变化情况,仿真将接收端水平位置设置在巷道中心处,为避免高度差引起的额外传播损耗,接收端垂直高度为距离地面 1.7 m 处,与发射天线保持一致。图 12 为传输距离 100 m 接收功率变化情况。

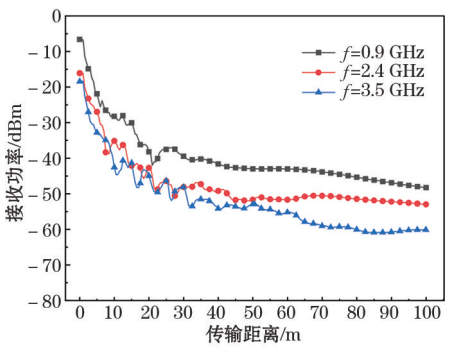


图 12 不同工作频率下信号接收功率随传输距离的变化情况

Fig.12 The variation of signal reception power with transmission distance at different operating frequencies

由图 12 可以看出,在 100 m 传输距离内,0.9 GHz 作为天线发射频率时的接收功率始终保持在最高水平,2.4 GHz 和 3.5 GHz 在近场范围内的接收功率幅值较为接近,但在较远距离传输阶段,2.4 GHz 频段下功率幅值高于 3.5 GHz。此外,还可以观察到 3 种频率下接收功率衰减趋势均表现为近场衰减快、波动频繁,远场衰减速率和波动趋于平缓的特点,且随着频率的升高,近场的波动范围扩大。这是因为近场区域电波传播路径较短,高次模和低次模在近场范围共同作用,接收功率出现快速衰减和频繁波动。随着距离的增加,高次模快速衰减,远场剩余少量低次模,而低次模随传输距离变化缓慢,因此远场衰减率和波动更平缓。表 3 为 3 种工作频段下电磁波传输距离 100 m 内接收功率均值。

表 3 电磁波传输距离 100 m 内接收功率均值

Table 3 The average received power within 100 m of electromagnetic wave transmission distance

工作频段/GHz	功率均值/dBm
0.9	−38.79
2.4	−46.26
3.5	−52.07

结合表 3 可得,0.9 GHz 工作频段下传输 100 m 信号接收功率均值比 2.4 GHz 频段下接收功率均值高出 7.47 dBm,比 3.5 GHz 频段下接收功率均值高出 13.28 dBm。因此,与 2.4 GHz 和 3.5 GHz 相比,0.9 GHz 频段在巷道中无线传输损耗小、无线传输距离远,能够提供更稳定的无线电波传播,在井下通信频率设计中可作为首选频段。后续仿真均采用 0.9 GHz 作为工作频段。

2.3 天线水平位置的影响

矿山井下天线位置直接影响到信号的覆盖范围以及强度,确定天线的最佳位置需综合考虑多种因素,既要确保较好的通信质量,又要避免对运输作业造成影响。以截面宽 5 m、高 3.4 m 的矩形直巷道为研究对象,分析发射天线位于不同截面位置时巷道内部电磁波传输情况。将巷道中心设为坐标原点,发射天线从巷道中心开始每隔 0.2 m 向两侧移动,因贴近巷壁时衰减较大,在距离巷壁 0.3 m 时,调整移动间隔为 0.1 m,距巷壁 0.1 m 时,在±2.45 m、±2.47 m、±2.49 m、±2.5 m 位置处进行密集仿真,共得到 35 个位置样点。发射天线工作频段为 0.9 GHz,垂直高度固定为 1.7 m,接收点始终与发射天线同侧且同一高度,图 13 展示了传输距离 100 m 内接收功率随天线水平位置变化的等高线图。

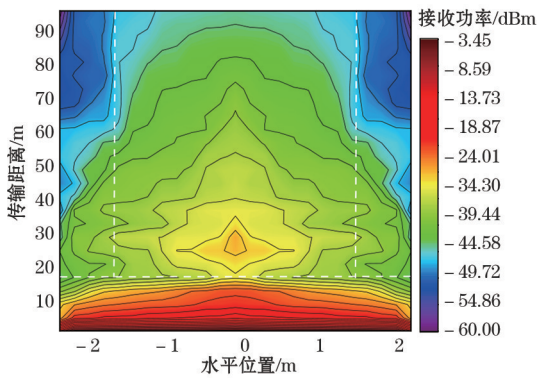


图 13 天线不同水平位置接收功率等高线图

Fig.13 Contour plots of the received power at different horizontal positions of the antenna

如图 13 所示,接收功率等高线呈左右对称分布特征。在 0～17 m 传输距离内,等高线密集分布,信号功率快速衰减,其中巷道中心位置功率衰减梯度为 1.59 dBm/m,而靠近巷壁区域则增至 1.82 dBm/m。在 17～100 m 传输范围内,天线水平位置导致的功率分布呈现明显差异,水平中心区域($|x|<1.6$ m)接收功率维持在−28～−46 dBm 的较高水平,功率等高线分布稀疏且衰减梯度平缓,衰减梯度小于 0.26 dBm/m;在两侧近壁区域(1.6 m$<|x|<$2.5 m)接收功率幅值处于−35～−58 dBm 的较低水平,功率等高线分布相对密集,衰减梯度大

于 0.33 dBm/m。

提取传输距离 10 m 接收功率随水平位置的变化情况，进一步分析天线水平位置对无线传输的影响，如图 14 所示。

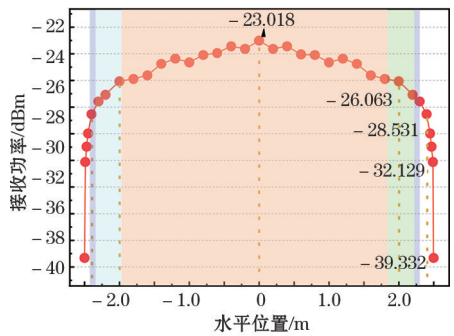


图 14　传输 10 m 处接收功率随天线水平位置变化情况

Fig.14　The received power at 10 m of transmission varies with the horizontal position of the antenna

由于矩形巷道的对称特性，发射天线靠近左侧巷壁与靠近右侧巷壁时接收功率的变化趋势一致，因此只对靠近右侧巷壁的过程进行分析。由图 14 可知，发射天线位于巷道中心时，接收功率幅值最大(−23.018 dBm)，随着天线向巷壁靠近，接收功率幅值逐渐减小。根据衰减速率可将这一过程分为 4 个阶段。第一阶段(0＜x＜2 m，即天线距离巷壁小于 0.5 m 范围内)，接收功率幅值保持在−23.018～−26.063 dBm 之间，衰减缓慢；第二阶段(2 m＜x＜2.4 m，即距离巷壁 0.1～0.5 m 范围内)，接收功率幅值衰减速率增大；第三阶段(2.4 m＜x＜2.49 m，即距离巷壁 0.1～0.01 m 范围内)，接收功率幅值衰减速率进一步加快，此时天线非常接近巷壁，电磁波的近场效应显著，巷壁对电磁波的吸收和反射作用增强；第四阶段(2.49 m＜x＜2.5 m，即距离巷壁小于 0.01 m 至紧贴巷壁)，接收功率从−32.129 dBm 快速降至−39.332 dBm，当天线紧贴巷壁部署时，电磁波的传播路径受到限制，壁面的吸收和反射效应达到最大。因此，为了兼顾信号质量与巷道运输通行，天线应避免紧贴巷壁或过于靠近中心。仿真结果表明，天线距巷壁大于 0.01 m 且小于 0.1 m 时，接收功率虽较中心有衰减，但仍在可接受范围，既能避免信号大幅衰减，又不影响通行。

图 15 展示了发射天线距巷壁 0.01 m 的功率三维分布图。可以看出，当发射天线位于巷道侧壁时，功率分布呈现非对称特性。在近场区域，因天线位置偏离导致非对称多径传播，两侧壁反射路径差异引起干涉效应的非对称分布。图 16 展示了发射天线距离巷道侧壁 0.01 m，传输距离 50 m、80 m、100 m 处接收功率纵向切面分布图。



图 15　发射天线距巷道 0.01 m 功率三维分布

Fig.15　Three-dimensional power distribution of the transmitting antenna at 0.01 m from the roadway

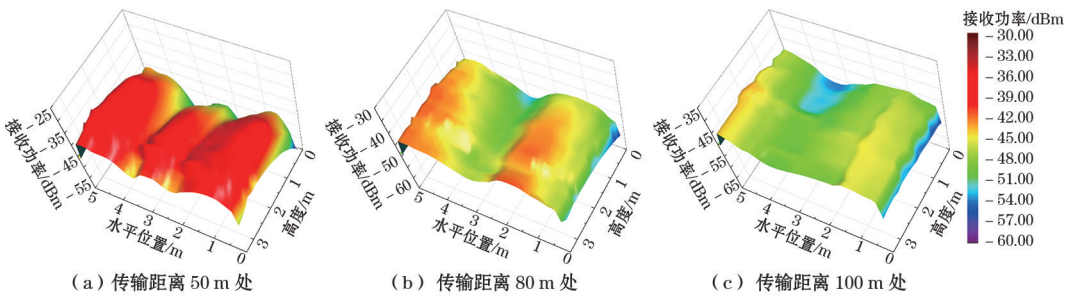


图 16　天线距巷壁 0.01 m 时不同传输距离纵向切面

Fig.16　Longitudinal section of different transmission distances when the antenna is 0.01 m away from the roadway wall

图 16 可以观察到，由于天线靠近侧壁，功率分布呈现出明显的非对称性。图 16(a)为传输距离 50 m 处，整体功率水平介于−35～−55 dBm 之间，其中上部区域(高度 0.7 m＜y＜3.4 m)功率较高，为−35～−44 dBm，而近地面区域(0＜y＜0.7 m)功率显著降低，为−40～−55 dBm。x 方向上，功率

幅值在 0.15 m＜x＜1.7 m、2.25 m＜x＜3 m 和 3.7 m＜x＜4.8 m 三个区间出现波峰，两侧近壁区域功率维持在－43～－51 dBm，且靠近左侧巷壁处功率衰减比靠近右侧壁的功率幅值低约 1～3 dBm。由图 16(b)可以观察到，传输距离 80 m 处，整体功率水平处于－41～－55 dBm 范围，y 方向上高度 0.7 m＜y＜3.4 m 功率较高，为－41～－51 dBm，而近地面区域(0＜y＜0.7 m)功率较低，为－44～－56 dBm。x 方向上，功率分布在 0.5 m＜x＜2 m 和 3.5 m＜x＜4.8 m 两个区间形成波峰，而在 2 m＜x＜3.5 m 区间则出现波谷。此外，靠近左侧巷壁区域的功率普遍比右侧低 2～4 dBm。由图 16(c)可以观察到，传输距离 100 m 处，整体功率处于－44～－56 dBm，y 方向上仍表现为上部区域(0.7 m＜y＜3.4 m)功率较高，为－43～－53 dBm，近地面区域(0＜y＜0.7 m)功率较低，为－46～－56 dBm。x 方向上，功率分布在 0.2 m＜x＜1.2 m 和 4.2 m＜x＜4.8 m 两个区间达到局部最大值，而区域(高度 2.5 m＜x＜3.7 m，0＜y＜1.5 m)区域幅值明显凹陷，大约在－51～－54 dBm，紧邻巷道两侧壁面的功率较低，其中与发射天线同侧的近壁接收区域功率幅值比另一侧近壁接收区域高出 3～4 dBm。

2.4 天线垂直高度的影响

研究天线高度对接收功率的影响时，以 0.9 m 为起点改变天线垂直高度，每隔 0.3 m 向上移动一次，直至接近巷道顶部，共设置 9 个高度点，覆盖了井下固定通信设施的高度范围。发射天线工作频段为 0.9 GHz，接收点水平位置与发射天线一致，基于实际接收端的高度考虑，将接收点高度固定在 1.7 m，每个天线位置对应的计算结果取传输距离 100 m 内的接收功率均值，不同高度下接收功率均值变化情况如图 17 所示。

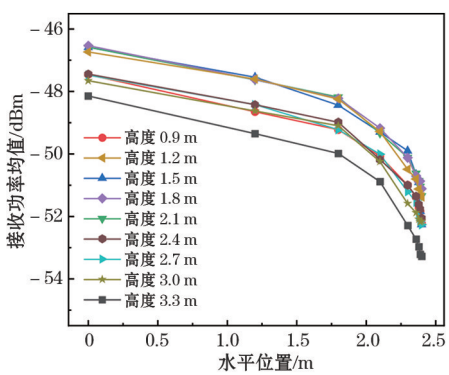


图 17 天线高度对接收功率的影响

Fig.17 The effect of antenna height on received power

发射天线垂直高度为 1.2 m、1.5 m、1.8 m、2.1 m 时处于巷道中间高度段，接收功率均值相近且维持在较高水平，此时发射天线与接收端高度差为 0.1～0.5 m；发射天线垂直高度为 0.9 m、2.4 m、2.7 m、3.0 m 时接收功率均值相近，与接收端高度差为 0.7～1.3 m；发射天线垂直高度为 3.3 m 时，与接收端高度差为 1.6 m，接收功率均值较低。这是由于在 1.2～2.1 m 高度范围接近接收点高度 1.7 m，信号传播路径更接近直线，减少了多径效应，能够获得稳定且较强的信号接收效果，发射天线高度为 0.9 m、2.4 m、2.7 m 和 3.0 m 时接收功率均值低于上述中间高度段，但差异不大，在实际应用中仍可接受，当受其他设备安装位置限制时可作为备选高度方案。

2.5 模拟与实测对比

为验证 SBR 路径损耗模型的准确性，依据文献[24]中的巷道尺寸构建 SBR 模型，仿真了传输距离 100 m 接收功率变化曲线，与巷道实测获得的 10 个离散采样点的接收功率数据进行对比，结果如图 18 所示。可以观察到，仿真结果与实际矿井巷道现场实测数据的主体结果基本吻合，说明仿真结果具有良好的准确性。

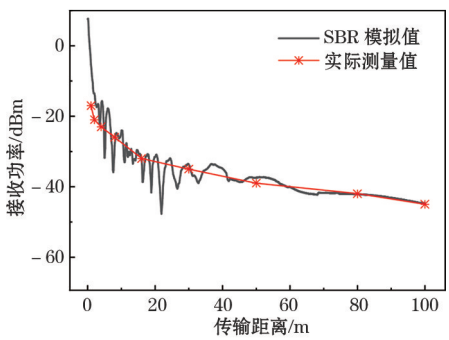


图 18 模拟结果与测量结果对比

Fig.18 Comparison of simulation results with measurement results

3 结论

(1) 0.9 GHz 频段在矿山巷道中更具传输优势，其不同传输距离处纵向切面的功率均值较 2.4 GHz 高出 6.60～9.17 dBm，较 3.5 GHz 频段高出 10.49～12.63 dBm，可作为矿井无线传输的优选频段。

(2) 为兼顾无线传输质量与巷道通行需求，天线应避免紧贴巷壁，距巷壁大于 0.01 m 且小于 0.1

m时为较优距离范围，能避免信号大幅衰减，当发射天线紧贴巷壁部署(距巷壁小于0.01 m)时，巷道三维空间功率分布呈非对称特性，发射天线同侧近壁区域接收功率较对侧近壁区域稳定高出1～4 dBm。

(3) 发射天线最佳的高度范围为巷道中心高度段，与接收端高度差小于0.5 m时，能够获得稳定且较强的信号接收效果，收发端高度差0.5～1.2 m时，接收功率有所衰减，但差异不大，在实际应用中可作为备选高度方案。

4 应用前景

本研究建立的巷道电磁传播模型为矿山智能化通信系统提供了关键理论依据，其工程价值主要体现在以下应用场景：

(1) 优选的0.9 GHz无线工作频段能显著提升信号传输距离与稳定性，可有效克服井下多径效应，为语音通信、传感器数据回传等关键业务提供可靠信道，减少基站用量，降低组网成本；

(2) 无线基站天线最佳位置的选定可指导基站与天线的最优布设，在不影响人车通行的情况下能够确保巷道内信号强度的最优空间分布；

(3) 电磁场三维空间仿真结果，可科学指导矿用手机、便携式无线设备、车载设备等移动终端的优化布置，为井下物联网通信网络构建提供理论依据；

(4) 所构建的矿山井下电磁场计算模型，可为高强度强均匀性电磁场构建提供设计指导，有望应用于不同尺度矿山井下三维空间无线信号分布预测，减少新矿区的通信部署试错成本。

参考文献(References)：

[1] 柳小波，丛峰武，张宝金，等.我国金属矿山智慧化转型实践与展望[J].金属矿山，2025(4)：1-20.
LIU Xiaobo, CONG Fengwu, ZHANG Baojin, et al. Practice and prospect of intelligent transformation of metal mines in China[J]. Metal Mine, 2025(4): 1-20.

[2] 薛棋文，丁震.基于5G通信的露天矿矿用卡车采掘运输自动化控制方法[J].矿业研究与开发，2024，44(8)：206-213.
XUE Qiwen, DING Zhen. Automated control method for mining and transportation of mining truck in open-pit mine based on 5G communication [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(8): 206-213.

[3] 鞠建华，韩见，鞠方略.中国智能矿山发展趋势与路径分析[J].中国矿业，2023，32(5)：1-7.
JU Jianhua, HAN Jian, JU Fanglue. Development trend and path analysis of intelligent mines in China[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(5): 1-7.

[4] 王勇，吴爱祥，杨军，等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报，2023，45(8)：1281-1292.
WANG Yong, WU Aixiang, YANG Jun, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(8): 1281-1292.

[5] 胡乃民.非煤智慧矿山建设中5G技术应用前景[J].金属矿山，2021(8)：158-163.
HU Naimin. Prospects for the application of 5G technology in the construction of non-coal smart mines[J]. Metal Mine, 2021(8): 158-163.

[6] LI Dawei, WANG Junhong. Effect of antenna parameters on the field coverage in tunnel environments[J]. International Journal of antennas and propagation, 2016(1): 8180124.

[7] 孙继平，彭铭.室内电磁波传播衰减统计模型用于矿井的适用性研究[J].工矿自动化，2025，51(2)：1-8.
SUN Jiping, PENG Ming. Study on applicability of indoor electromagnetic wave propagation attenuation statistical models in mines[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(2): 1-8.

[8] 霍振龙.矿井无线通信系统现状与发展趋势[J].工矿自动化，2022，48(6)：1-5.
HUO Zhenlong. Current situation and development trend of mine wireless communication system[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 1-5.

[9] SAMAD M A, CHOI S W, KIM C S, et al. Wave propagation modeling techniques in tunnel environments: a survey[J]. IEEE Access, 2023, 11: 2199-2225.

[10] QIAN Jingyuan, WU Yating, SALEEM A, et al. Path loss model for 3.5 GHz and 5.6 GHz bands in cascaded tunnel environments[J]. Sensors, 2022, 22(12): 4524.

[11] LI Boyu, DING Ting, WU Yanhui, et al. Modeling and optimization of wireless signal transmission characteristics of mine roadway based on 3D ray-tracing method[J]. Applied Sciences, 2024, 14(4): 1534.

[12] JI Xingyu, WANG Chengxiang, CHANG Hengtai. Characteristic analysis and modeling of underground space wireless communication channels [C]//2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). New York: IEEE, 2022: 1-5.

[13] ZHAO Zhenyu, WANG Junhong, HOU Weibin. Effect of beam angle of the transmitting antenna on radio wave coverage in the region containing tunnel entrance[J]. IEEE Access, 2022, 10: 97248-97258.

[14] YOU Yusong, JING Liujie, YANG Qinghai, et al. Analysis and modeling of radio propagation fading characteristics in tunnel construction[J]. Heliyon, 2024, 10(4): e26231.

[15] ZHOU Chenming, PLASS T, JACKSHA R, et al. RF Propagation in mines and tunnels: extensive measurements for vertically, horizontally, and cross-polarized signals in mines and tunnels [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2015, 57(4): 88-102.

[16] ZHAI Menglin, ZHAI Kai, CUI Hengrong, et al. Multifrequency channel characterization for curved tunnels [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021,20(12):2457-2460.

[17] ZHOU Chenming, JACKSHA R. Modeling and measurement of radio propagation in tunnel environments[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2016,16:1431-1434.

[18] 张高敏,刘毅,彭铭.FDTD矿井无线传输特性分析方法研究[J].煤炭科学技术,2022,50(11):202-212.
ZHANG Gaomin, LIU Yi, PENG Ming. Research on the FDTD analysis method of wireless transmission characteristics in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11):202-212.

[19] ABDULWAHID M M, KURNAZ S. Implementation of 2D ray SBR modeling for different MIMO antenna array placement in outdoor communication using wireless InSite software[J]. Research Square,2023(1):2487125.

[20] 焦晓龙,成凌飞,张薇静,等.矩形巷道载波频率对近场区分界点的影响[J].煤炭科学技术,2021,49(9):124-128.
JIAO Xiaolong, CHENG Lingfei, ZHANG Weijing, et al. Influence of carrier frequency on demarcation points of near field in rectangular roadway [J]. Coal Science and Technology,2021,49(9):124-128.

[21] MENG Wei, LI Juan, XI Yongji, et al. An improved shooting and bouncing ray method based on blend-tree for EM scattering of multiple moving targets and echo analysis [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2024, 72(3):2723-2737.

[22] KASDORF S, TROKSA B, KEY C, et al. Advancing accuracy of shooting and bouncing rays method for ray-tracing propagation modeling based on novel approaches to ray cone angle calculation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2021,69(8):4808-4815.

[23] 张勇,孟积渐,陈湘源,等.煤矿井下5G电磁波瓦斯引燃机理及功率安全阈值[J].煤炭学报,2025,50(3):1804-1826.
ZHANG Yong, MENG Jijian, CHEN Xiangyuan, et al. Study on the ignition mechanism of methane by 5G electromagnetic waves and power safety thresholds in underground coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2025,50(3):1804-1826.

[24] 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]. Journal of Mine Automation,2020,46(5):1-7.