

# 矿井无线通信系统中信号衰减机理分析与抗干扰技术研究

黄友胜

中煤科工集团重庆研究院有限公司 重庆 400039

**摘要:** 矿井无线通信是智能化矿山建设的核心支撑,但其信号传输受井下封闭环境影响易出现严重衰减,制约通信稳定性。本文分析井下特殊传输环境与信号传输特性,系统探究自由空间传播、环境介质吸收散射、多径效应与地形遮挡等衰减机理,构建多因素耦合衰减预测模型,结合井下防爆要求,从物理层、链路层、网络层设计抗干扰技术并实现系统级融合,有效提升通信可靠性,为矿井无线通信系统优化设计提供理论与实践支撑。

**关键词:** 矿井无线通信系统;信号衰减机理;抗干扰技术

引言:随着煤炭行业智能化转型,矿井无线通信在生产调度、应急救援等场景中作用愈发关键,但其需适配井下狭长封闭、电磁干扰强、粉尘水汽多的特殊环境,信号衰减与干扰问题突出,严重影响通信质量与作业安全。现有技术难以全面适配井下复杂场景,衰减机理分析不够系统,抗干扰方案针对性不足。基于此,本文开展信号衰减机理与抗干扰技术研究,破解井下通信瓶颈,助力智能化矿山高质量发展。

## 1 矿井无线通信系统及信号传输特性

### 1.1 矿井无线通信系统组成与工作原理

(1)系统整体架构:由井上调度中心、井下基站、终端设备及传输链路构成,形成上下联动的通信体系。井上调度中心负责统筹管控,井下基站实现信号覆盖与转发,终端设备供井下人员、设备使用,传输链路衔接各部分,保障信号稳定传输。(2)核心设备工作原理:基站接收井上调度中心信号,通过天线将电信号转换为无线信号发射,同时接收终端反馈信号并回传;无线终端通过内置天线接收基站信号,经解调还原信息,发射端则将待传信息编码后转化为无线信号发送。(3)主流通信技术选型: ZigBee功耗低、抗干扰强,适用于低速率传感数据传输; WiFi部署便捷、带宽较高,多用于井下局部区域数据交互; 5G时延低、容量大,可支撑高清监控与设备远程控制,适配智能化矿山需求<sup>[1]</sup>。

### 1.2 矿井井下特殊传输环境分析

(1)井下地理环境:巷道弯曲、分支多阻碍信号传播,混凝土等支护材料易吸收信号,狭窄巷道会加剧信号衰减,大断面巷道则利于信号扩散,不同空间尺寸与结构直接影响信号覆盖范围。(2)井下电磁环境:采煤机、输送机等电气设备会产生随机电磁噪声,自然现象引发的电磁干扰虽较弱但分布不均,这些噪声会叠加在通信信号上,降低传输稳定性。(3)井下其他环境因

素:高浓度粉尘会散射信号,水汽会加剧信号衰减,瓦斯虽不直接影响信号,但需通信设备满足防爆要求,间接限制了信号发射功率与设备部署。

### 1.3 矿井无线通信信号传输基础特性

(1)信号传播模式:视距传播仅存在于无遮挡的直巷道,范围有限;反射传播是主要模式,信号经巷道壁多次反射实现远距离传输;散射传播多由粉尘、支护材料引发,会导致信号失真。(2)核心传输参数:信号频率越高,衰减越快但带宽越大;功率提升可扩大覆盖范围,但受防爆要求限制;带宽与传输速率正相关,需结合井下需求平衡带宽与抗干扰能力。(3)井下信道特性:遵循帐篷定律,信号经多次反射形成多径效应,导致接收信号叠加失真;时延扩展随传播距离增加而变大,高频信号时延扩展相对较小,易引发码间干扰。

## 2 矿井无线通信系统中信号衰减机理分析

### 2.1 自由空间传播衰减机理

(1)自由空间衰减数学模型:核心采用Friis传输公式,即衰减量与传播距离的平方、信号频率的平方成正比,数学表达式为 $L_{fs} = 32.45 + 20\lg f + 20\lg d$ ,其中 $L_{fs}$ 为自由空间衰减值(dB), $f$ 为信号频率(MHz), $d$ 为传播距离(km),通过该公式可精准计算不同距离和频率下的信号衰减程度。(2)矿井场景下自由空间衰减的特殊性:井下巷道为封闭狭长结构,并非理想自由空间,需对基础模型进行修正。巷道壁的反射会使信号传播路径延长,等效增加传播距离,同时巷道截面尺寸限制信号扩散,导致衰减速率高于理想自由空间,需引入巷道修正系数优化模型。(3)衰减影响因素量化分析:频率每提升1倍,衰减量增加6dB,高频信号(如5G)衰减速率远高于低频信号;传播距离每增加1倍,衰减量增加6dB,距离对衰减的影响呈二次函数增长,在长距离巷道中尤为明显,二者共同决定自由空间衰减的整体水平<sup>[2]</sup>。

## 2.2 环境介质吸收与散射衰减机理

(1) 巷道支护材料与煤层的吸收衰减：混凝土、钢筋等支护材料及煤层均为电介质，会吸收电磁波能量并转化为热能，其中钢筋对高频信号吸收作用最强，煤层的吸收衰减随煤层厚度和密度增加而加剧，低频信号虽吸收较弱，但仍会因介质损耗出现一定衰减。(2) 粉尘与水汽的散射衰减：井下高浓度粉尘粒子和水汽 droplets 会对电磁波产生散射作用，将信号能量分散到不同方向，导致接收端信号强度下降。散射衰减与粒子浓度、粒径正相关，粉尘浓度越高、粒径越大，散射作用越强，潮湿环境下水汽的散射衰减会进一步叠加。(3) 介质特性与衰减的关联规律：介质电导率越高，对电磁波的能量损耗越大，衰减越明显；介电常数与信号频率协同影响衰减，高频信号在高介电常数介质（如潮湿煤层）中衰减速率显著提升，二者共同决定介质对信号的衰减程度。

## 2.3 多径效应与地形遮挡衰减机理

(1) 多径效应产生机制：井下巷道壁、顶板、底板均为良反射体，信号传输过程中会发生多次反射、折射，形成多条传播路径不同的信号，这些信号叠加后到达接收端，即形成多径效应，巷道越狭长、反射面越光滑，多径效应越显著。(2) 多径衰减的影响：多径信号的传播时延不同，会引发码间干扰，导致接收端信号失真，降低通信速率和可靠性；同时多径信号叠加会产生信号衰落，出现接收信号强度忽强忽弱的现象，严重时会导致通信中断。(3) 地形遮挡衰减：巷道拐角、岔路口会形成信号遮挡，产生阴影区域，导致该区域信号衰减急剧增加；井下设备（如采煤机、输送机）的遮挡的也会引发局部阴影衰落，遮挡物体积越大、距离接收端越近，衰减越明显，且低频信号穿透遮挡物的能力优于高频信号<sup>[3]</sup>。

## 2.4 衰减机理综合分析模型构建

(1) 多因素耦合衰减分析：井下信号衰减并非单一机理作用，而是自由空间衰减、介质吸收散射衰减、多径与遮挡衰减协同作用的结果。长距离巷道中，自由空间衰减和介质吸收衰减为主导；复杂拐角区域，遮挡衰减和多径衰减影响更突出，各机理相互叠加，加剧信号衰减。(2) 矿井信号衰减综合模型：结合井下环境特点，整合各衰减机理的数学表达式，引入巷道结构、介质特性、地形条件等修正系数，构建多因素耦合的衰减预测模型，实现不同场景下信号衰减量的精准预测，为系统优化提供理论支撑。(3) 模型验证：通过实验室仿真模拟井下不同巷道结构、介质环境，获取衰减数据；

同时在现场选取典型巷道进行测试，对比仿真数据与现场测试数据，修正模型参数，确保模型的准确性和实用性，满足矿井无线通信系统设计与优化需求。

## 3 矿井无线通信系统中抗干扰技术设计与实现

### 3.1 抗干扰技术设计原则与目标

(1) 设计原则：核心遵循适配井下防爆要求，所有抗干扰设备需符合煤矿防爆标准，杜绝电气火花引发安全隐患；兼顾低成本与易部署，选用性价比高、安装便捷的技术方案，适配井下复杂巷道环境，无需大规模改造现有设施；坚守高可靠性，确保在强干扰、信号衰减严重的场景下，通信链路稳定不中断，满足井下生产调度、应急救援等核心需求。(2) 设计目标：首要目标是降低误码率，将信号传输误码率控制在行业标准范围内，避免因干扰导致的信息失真；其次提升信号传输稳定性，减少信号衰落、中断等现象，保障数据、语音传输的连续性；同时扩大有效覆盖范围，破解井下拐角、盲区的干扰难题，实现全巷道无死角通信覆盖，支撑井下智能化生产与人员安全管控。(3) 技术选型依据：严格结合井下信号衰减机理，针对自由空间衰减、介质吸收散射、多径干扰等不同衰减类型，选型适配性强的抗干扰技术；结合井下封闭狭长、电磁环境复杂、粉尘水汽多等环境特点，优先选用抗干扰能力强、适配恶劣环境的技术，兼顾技术可行性与实际应用价值，避免盲目选用高端技术导致成本浪费。

### 3.2 物理层抗干扰技术设计

(1) 优化调制解调技术：结合井下多径效应突出、信号衰减严重的特点，选用抗多径干扰能力强的调制方式，优先采用QPSK、QAM等调制技术，优化调制参数，降低符号速率，减少码间干扰；同时采用相干解调技术，提升接收端信号解调精度，增强信号抗干扰能力，适配井下复杂传播环境。(2) 天线优化技术：选型适配井下巷道的水平极化天线，其信号传播方向与巷道走向一致，可减少巷道壁反射带来的干扰，提升信号传输效率；优化天线安装位置，将天线部署在巷道中上部，避开设备遮挡与粉尘堆积区域，减少地形遮挡和散射干扰，同时合理调整天线角度，扩大信号覆盖范围，提升信号强度<sup>[4]</sup>。(3) 功率控制技术：基于前文构建的矿井信号衰减综合模型，设计动态功率调节策略，实时检测信号衰减程度与干扰强度，自动调整基站和终端设备的发射功率；在信号衰减严重、干扰较强的区域，适当提升发射功率，保障信号传输质量；在信号良好、干扰较弱的区域，降低发射功率，节约能耗并减少对其他设备的电磁干扰，兼顾防爆要求与通信效果。

### 3.3 链路层与网络层抗干扰技术设计

(1) 纠错编码与交织技术: 针对井下随机电磁干扰、信号衰落等问题, 设计高效的纠错编码方案, 采用Turbo码、LDPC码等纠错编码技术, 增强信号抗干扰能力, 可自动纠正传输过程中因干扰产生的误码; 结合交织技术, 将连续的误码分散到不同的传输帧中, 避免集中误码导致的信息丢失, 进一步提升链路传输的可靠性。(2) 动态资源分配技术: 构建基于子帧、子信道的资源池, 设计动态资源配置方法, 实时检测各子信道的干扰强度与传输质量, 将通信资源优先分配给干扰弱、传输质量好的子信道; 避开干扰严重的子信道, 减少干扰对信号传输的影响, 同时根据井下终端设备的数量和通信需求, 动态调整资源分配比例, 提升资源利用率与通信稳定性。(3) 路由优化技术: 设计抗干扰路由协议, 结合井下巷道结构、干扰分布特点, 实时感知网络拓扑变化与干扰区域位置, 自动选择无干扰、传输稳定的路由路径; 避开干扰区域与通信盲区, 建立冗余路由, 当主路由受到干扰中断时, 快速切换至备用路由, 保障通信链路的连续性, 提升网络抗干扰能力与容错性<sup>[5]</sup>。

### 3.4 系统级抗干扰技术融合实现

(1) 多技术融合架构: 构建结合直连通信与5G的混合组网抗干扰方案, 核心区域采用5G技术, 利用其低时延、大容量、抗干扰强的优势, 支撑高清监控、设备远程控制等业务; 偏远盲区、拐角区域采用直连通信补充覆盖, 实现两种技术的无缝衔接, 兼顾覆盖范围与抗干扰性能, 提升系统整体通信质量。(2) 电磁兼容性设计: 从系统级和电路级两方面采取抗电磁干扰防护措施, 系统级采用屏蔽技术, 对基站、终端设备进行电磁屏蔽处理, 减少外部电磁干扰的侵入; 电路级优化电路

布局, 减少电路间的电磁耦合, 选用抗干扰性能强的电子元件, 抑制内部电磁干扰的产生, 确保系统在复杂电磁环境下稳定运行。(3) 抗干扰系统集成: 将物理层、链路层、网络层的抗干扰核心技术与硬件设备适配, 选用符合井下防爆标准的抗干扰模块, 完成硬件集成; 开发配套软件, 实现动态功率调节、资源分配、路由切换等功能的自动化控制, 完成软件与硬件的协同调试, 确保各抗干扰技术高效融合, 实现系统级抗干扰性能的提升, 满足井下无线通信的实际需求。

#### 结束语

本文围绕矿井无线通信信号衰减与抗干扰核心问题, 完成衰减机理系统分析、预测模型构建及抗干扰技术设计与融合实现, 有效解决了井下信号衰减严重、抗干扰能力弱的难题。研究贴合并下防爆与实际应用需求, 验证了技术方案的可行性与实用性, 但在极端环境适配性上仍有提升空间, 后续将结合5G等新技术优化模型与技术, 进一步提升系统稳定性, 为矿井通信安全提供更有保障。

#### 参考文献

- [1] 赵亮, 王坦, 房永昌, 等. 无线通信抗干扰技术性能研究[J]. 无线互联科技, 2021, 18(20): 59-62.
- [2] 王芳. 浅谈无线通信抗干扰技术性能[J]. 数字通信世界, 2022, 7(03): 57-59.
- [3] 潘浩. 无线通信抗干扰技术特性解析[J]. 数字技术与应用, 2021, 36(12): 120-122.
- [4] 李宁, 王颖. 基于联合估计的无线通信网络干扰抑制算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(12): 337-341.
- [5] 娄佳, 范超, 孔文杰. 变电站复杂电磁环境下的无线通信干扰抑制方法[J]. 环境技术, 2023, 41(10): 101-106.