



文章编号: 1671-251X(2025)02-0001-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.18234

室内电磁波传播衰减统计模型用于矿井的适用性研究

孙继平, 彭铭

(中国矿业大学(北京)人工智能学院, 北京 100083)

摘要: 5G, 5.5G, WiFi6, WiFi7, UWB, ZigBee 等矿井移动通信、人员和车辆定位、无线视频和无线传感等系统的设计、规划和优化, 需进行矿井电磁波传播分析。电磁波传播衰减统计模型是预测电磁波传播衰减的有效方法。分析研究了室内电磁波传播衰减统计模型在矿井的适用性: ① 矿井电磁波传播为有限空间特殊环境中远距离传播, 与地面室内长方体简单环境中近距离电磁波传播不同。② 矿井巷道四周为较厚的煤岩, 对电磁波具有较强的吸收能力, 巷道支护材料进一步阻挡了电磁波穿透, 一般不考虑电磁波穿墙衰减。室内-室内电磁波传播衰减统计模型中的 COST-Multi-Wall 模型、Keenan-Motley 模型考虑电磁波穿墙衰减, 不适用于矿井。③ 矿井的基站和无线终端均在巷道内, 为有限空间内部电磁波传播。室外-室内电磁波传播衰减统计模型适用于基站在室外开放空间、无线终端在室内有限空间的电磁波传播, 不适用于矿井。分析研究了室内电磁波传播衰减统计模型对矿井不同场景(矿井辅助运输大巷、掘进巷道、拐弯巷道、分支巷道、综采工作面)中电磁波传播衰减的预测误差: 利用室内电磁波传播衰减统计模型中的 WINNER II 模型、3GPP InH-Office 模型、ITU-R P.1238 模型、ITU-R M.2412 InH 模型预测矿井电磁波传播衰减时, 总的误差均值分别为 9.3, 8.2, 9.9, 7.7 dB, 由于预测误差较大, 这些模型不适用于矿井。目前没有专门针对矿井特殊环境建立的矿井电磁波传播衰减统计模型。因此, 有必要针对矿井有限空间特殊环境, 研究建立矿井电磁波传播衰减统计模型, 指导矿井通信基站和定位分站及其天线的设计和布置。

关键词: 矿井通信; 电磁波传播; 电磁波衰减; 统计模型; 基站布置

中图分类号: TD655

文献标志码: A

Study on applicability of indoor electromagnetic wave propagation attenuation statistical models in mines

SUN Jiping, PENG Ming

(School of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The design, planning, and optimization of mining communication systems, personnel and vehicle positioning, wireless video, and wireless sensing systems such as 5G, 5.5G, WiFi 6, WiFi 7, UWB, and ZigBee require analysis of electromagnetic wave propagation in mines. The statistical model of electromagnetic wave propagation attenuation is an effective method for predicting the attenuation of electromagnetic waves. The applicability of indoor electromagnetic wave propagation attenuation statistical models in mines is analyzed. ① Electromagnetic wave propagation in mines occurs over long distances in a confined and unique environment, which is different from the short-distance propagation in simple rectangular indoor environments on the ground.

收稿日期: 2025-02-12; 修回日期: 2025-02-16; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52074305)。

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。

引用格式: 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.



扫码移动阅读

② The surrounding walls of mine roadways are thick coal and rock which have strong abilities to absorb electromagnetic waves, and roadway support materials further block the penetration of electromagnetic waves. Therefore, electromagnetic wave attenuation through walls is typically not considered. In the indoor-to-indoor electromagnetic wave propagation attenuation statistical models, the COST-Multi-Wall model and Keenan-Motley model consider electromagnetic wave attenuation through walls, making them unsuitable for mines. ③ Both the base station and wireless terminal in mines are located within the roadways, representing electromagnetic wave propagation in a confined internal space. The outdoor-to-indoor electromagnetic wave propagation attenuation statistical model is applicable to scenarios where the base station is in an open outdoor space and the wireless terminal is in a confined indoor space, making it unsuitable for mines. Subsequently, this study analyzed the prediction errors of indoor electromagnetic wave propagation attenuation statistical models for different mine scenarios (e.g. auxiliary transportation roadways, excavation roadways, curved roadways, branch roadways, fully mechanized mining faces). When using the WINNER II model, 3GPP InH-Office model, ITU-R P.1238 model, and ITU-R M.2412 InH model in indoor electromagnetic wave propagation attenuation statistical models to predict electromagnetic wave propagation attenuation in mines, the overall mean errors were 9.3 dB, 8.2 dB, 9.9 dB, and 7.7 dB, respectively. Due to the significant prediction errors, these models are unsuitable for mines. Currently, no specific statistical model for mine electromagnetic wave propagation attenuation has been developed based on the unique environment of mines. Therefore, it is necessary to study and establish a statistical model for electromagnetic wave propagation attenuation in mines that is tailored to the confined space and special environment of mines to guide the design and layout of mine communication base stations, positioning sub-stations, and their antennas.

Key words: mine communication; electromagnetic wave propagation; electromagnetic wave attenuation; statistical model; base station layout

0 引言

5G, 5.5G, WiFi6, WiFi7, UWB, ZigBee 等矿井移动通信、人员和车辆定位、无线视频和无线传感等系统的设计、规划和优化,需进行矿井电磁波传播衰减分析^[1-3]。在接收灵敏度一定的情况下,受国家标准 GB/T 3836.1—2021《爆炸性环境 第 1 部分:设备通用要求》^[4]限制,防爆无线电发射器的阈功率不得大于 6 W,矿井电磁波传播距离较小^[5-8]。提前设计和规划通信基站和定位分站(以下简称基站)及其天线的最佳布置方式,在保证无线通信质量的情况下,可以减少基站的用量,以降低系统建设成本和维护工作量^[9-10]。目前,矿井移动通信、人员和车辆定位、无线视频和无线传感等系统的设计和基站及其天线的布置主要依靠现场测试^[11-12],不同矿井的电磁波传播测试数据不能通用,存在测量复杂、效率低且难以优化等问题^[13]。因此,需采用理论计算方法对矿井电磁波传播衰减进行预测。统计分析方法是理论计算方法的一种,其通过对实测数据进行归纳分析,总结出一个(组)统计模型,具有简单易用的优点,便于基站及其天线布置的现场工程实际应用。然而,目前没有针对矿井特殊环境建立的矿井电磁波传播衰减统计模型。值得注意的是,矿井是有限

空间,地面室内也是有限空间,二者在空间特性上存在一定相似性。基于此,本文分析了室内电磁波传播衰减统计模型的适用范围及其在矿井的适用性。

1 室内电磁波传播衰减统计模型

用于办公室、商业楼、居民楼、工业场所、走廊等室内场景的室内电磁波传播衰减统计模型,主要有基站和无线终端均在室内的室内-室内电磁波传播衰减统计模型,基站在室外而无线终端在室内的室外-室内电磁波传播衰减统计模型,如图 1 所示。室内-室内电磁波传播衰减统计模型主要有 COST-Multi-Wall 模型、Keenan-Motley 模型、WINNER II 模型、3GPP InH-Office 模型、ITU-R P.1238 模型和 ITU-R M.2412 InH 模型等。室外-室内电磁波传播衰减统计模型主要有 IMT-2000 O2I 模型、3GPP O2I 模型、ITU O2I 模型等。

2 室内-室内电磁波传播衰减统计模型

2.1 COST-Multi-Wall 模型

COST-Multi-Wall 模型是基于 COST 231 模型得到的,适用于室内办公室场景,该模型可表示为^[14]

$$L_{CMW} = 32.4 + 20\lg(f/\text{GHz}) + 20\lg(d/\text{m}) + \xi + \sum \gamma_i L_{qi} + k \binom{k+2}{k+1} L_k \quad (1)$$

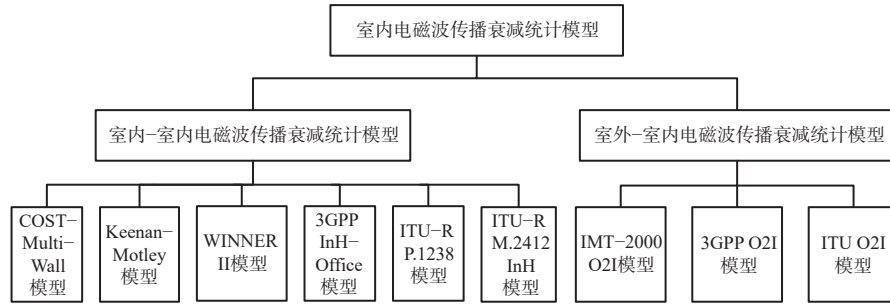


图1 室内电磁波传播衰减统计模型

Fig. 1 Statistical model of indoor electromagnetic wave propagation attenuation

式中: L_{CMW} 为 COST-Multi-Wall 模型预测出的电磁波传播衰减值, dB; f 为频率, GHz; d 为距离, m; ξ 为衰减常数, 通常设为 37 dB; γ_i 为穿透 i 型墙壁的数量; L_{qi} 为穿透 i 型墙壁的衰减值; k 为穿透的楼层数量; ς 为经验参数; L_k 为穿透相邻楼层间的衰减值, dB。

不同衰减类型的穿透衰减值见表 1。

表 1 不同衰减类型的穿透衰减值

Table 1 Penetration attenuation values for different attenuation types

衰减类型	具体描述	穿透衰减值/dB
L_k	典型的楼层(办公室): ① 空心砖; ② 钢筋混凝土; ③ 厚度 < 30 cm	18.3
L_{q1}	轻质内墙: ① 石膏板; ② 有大量孔洞的墙壁(如窗户)	3.4
L_{q2}	内墙: ① 混凝土, 砖; ② 孔洞数量少	6.9

2.2 Keenan-Motley 模型

Keenan-Motley 模型是适用于室内场景的电磁波传播衰减统计模型, 其在自由空间电磁波传播衰减模型的基础上考虑了墙壁和地板的穿透衰减, 该模型可表示为^[15]

$$L_{\text{Keenan-Motley}} = 32.4 + 20\lg(f/\text{GHz}) + 20\lg(d/m) + qL_q + gL_g \quad (2)$$

式中: $L_{\text{Keenan-Motley}}$ 为 Keenan-Motley 模型预测出的电磁波传播衰减值, dB; q 为穿过墙壁的数量; L_q 为穿过墙壁产生的额外衰减值, dB; g 为穿过地板的数量; L_g 为穿过地板产生的额外衰减值, dB。

2.3 WINNER II 模型

由欧盟的 WINNER 项目组开发的 WINNER II 定义了适用于室内办公室场景的电磁波传播衰减统计模型。该模型适用于预测收发天线高度在 1~2.5 m、距离在 3~100 m 范围内的电磁波传播衰减, 并考虑电磁波传播穿墙时产生的额外衰减, 其阴影衰落标准差在视距(Line of Sight, LOS)电磁波传播的情况下为 3 dB, 在非视距(Non Line of Sight, NLOS)电磁波传播的情况下为 4 dB^[16]。

在 LOS 电磁波传播情况下, WINNER II 模型预

测出的电磁波传播衰减值

$$L_{W-LOS} = 18.7\lg(d/m) + 46.8 + 20\lg(f/5 \text{ GHz}) \quad (3)$$

在 NLOS 电磁波传播情况下, WINNER II 模型预测出的电磁波传播衰减值

$$L_{W-NLOS} = 36.8\lg(d/m) + 43.8 + 20\lg(f/5 \text{ GHz}) + Y \quad (4)$$

式中 Y 为穿墙衰减值, dB, 对于轻质墙, $Y = 5 \times (m_w - 1)$, 对于重墙, $Y = 12(m_w - 1)$, m_w 为基站与无线终端之间墙的数量。

2.4 3GPP InH-Office 模型

3GPP TR 36.873 中定义了适用于室内的 InH-Office 模型, 该模型的适用无线频段为 2~6 GHz, 之后由 3GPP 的 5G 标准信道模型 3GPP TR 38.901 改进后适用无线频段为 0.5~100 GHz^[17-19]。该模型适用于预测距离为 1~150 m 范围内室内的电磁波传播衰减, 其阴影衰落标准差在 LOS 电磁波传播情况下为 3 dB, 在 NLOS 电磁波传播情况下为 8.03 dB 或 8.29 dB^[20]。

在 LOS 电磁波传播情况下, 3GPP InH-Office 模型预测出的电磁波传播衰减值

$$L_{\text{InH-Office-LOS}} = 32.4 + 17.3\lg(d/m) + 20\lg(f/\text{GHz}) \quad (5)$$

在 NLOS 电磁波传播情况下, 3GPP InH-Office 模型预测出的电磁波传播衰减值

$$L_{\text{InH-Office-NLOS}} = \max(L_{\text{InH-Office-LOS}}, L'_{\text{InH-Office-NLOS}}) \quad (6)$$

式中 $L'_{\text{InH-Office-NLOS}}$ 为阴影衰落标准差为 8.03 dB 或 8.29 dB 时 3GPP InH-Office 模型预测出的 NLOS 电磁波传播衰减值, dB。

$$L'_{\text{InH-Office-NLOS}} = \begin{cases} 38.3\lg(d/m) + 17.3 + 24.9\lg(f/\text{GHz}) \\ \text{阴影衰落标准差为 8.03 dB} \\ 32.4 + 20\lg(f/\text{GHz}) + 31.9\lg(d/m) \\ \text{阴影衰落标准差为 8.29 dB} \end{cases} \quad (7)$$

2.5 ITU-R P.1238 模型

国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)的无线电通信工作组发布了一系列用于预测室内电磁波传播衰减的建议书 ITU-R P.1238-

1—ITU-R P.1238-12。这里主要介绍 2023 年 8 月最新发布的 ITU-R P.1238-12^[21]中定义的模型, 其将电磁波传播衰减统计模型分为位置通用模型和位置专用模型两类。

1) 位置通用模型适用于发射和接收天线均位于同一楼层的情形, 位置通用模型可表示为

$$L_{ABG} = 10\alpha \lg(d/m) + \beta + 10\gamma \lg(f/\text{GHz}) + X_{\sigma} \quad (8)$$

式中: L_{ABG} 为位置通用模型预测出的电磁波传播衰减, dB; α, β, γ 为相关系数; X_{σ} 为阴影衰落, 是一个零均值、标准差为 σ 的高斯随机变量, dB。

不同室内场景中位置通用模型的相关系数建议值见表 2。

表 2 不同室内场景中位置通用模型的相关系数建议值
Table 2 Suggested values of correlation coefficients for general models of location under different indoor scenarios

环境	电磁波传播类型	频率/GHz	距离/m	α	β	γ	σ
办公室	LOS	0.3~83.5	2~27	1.46	34.62	2.03	3.76
	NLOS	0.3~82.0	4~30	2.46	29.53	2.38	5.04
走廊	LOS	0.3~83.5	2~160	1.63	28.12	2.25	4.07
	NLOS	0.625~83.5	4~94	2.77	29.27	2.48	7.63
工业场所	LOS	0.625~70.28	2~102	2.34	24.26	2.06	2.67
	NLOS	0.625~70.28	5~110	3.66	22.42	1.34	9.00
会议/演讲厅	LOS	0.625~82.0	2~21	1.61	28.82	2.37	3.28
	NLOS	7.075~82.0	4~25	2.07	28.13	2.67	3.67

2) 位置专用模型适用于波束宽度为 40° 的定向发射天线向相同楼层单个房间或空间内全向接收天线发射的电磁波传播, 其中不包括电磁波传播穿墙时产生的额外衰减。位置专用模型的表达式与位置通用模型(式(8))相同, 但其相关系数建议值不同, 不同室内场景中位置专用模型的相关系数建议值见表 3。

表 3 不同室内场景中位置专用模型的相关系数建议值
Table 3 Suggested values of correlation coefficients for specific models of location under different indoor scenarios

环境	电磁波传播类型	频率/GHz	距离/m	α	β	γ	σ
走廊	LOS	0.6~73.0	4.0~21.0	1.43	29.3	2.38	2.92
	NLOS		5.8~23.0	3.19	16.9	2.71	4.28
办公室	LOS	0.6~73.0	4.9~21.5	1.29	32.0	2.32	2.75
	NLOS		14.2~29.2	3.46	14.1	2.61	3.04
工业场所	LOS	0.6~73.0	5.8~25.7	1.84	24.6	2.43	2.29
	NLOS		6.5~25.9	2.92	22.3	3.34	6.14

用于特定场景的电磁波传播衰减统计模型也可采用如下形式:

$$L_{ITU-P} = 32.4 + 20\lg(f/\text{GHz}) + 20\lg(d/m) + T\lg(d/d_0) + L(j) \quad (9)$$

式中: L_{ITU-P} 为特定场景的电磁波传播衰减统计模型预测出的电磁波传播衰减值, dB; T 为室内功率衰减系数; $L(j)$ 为穿透 j 层楼层时的穿透衰减因子, dB, 当 $j=0$ 时, $L(j) = 0$ 。

ITU-R P.1238-12 给出了不同室内场景和频率下的功率衰减系数 T 、穿透 j 层楼层时的穿透衰减因子 $L(j)$, 分别见表 4 和表 5。

表 4 不同室内场景和频率下的功率衰减系数 T
Table 4 Power attenuation coefficient T under different indoor scenarios and frequencies

频率/GHz	功率衰减系数 T				
	办公室	商业楼	工厂	走廊	数据中心
28	—	27.7 ^① 17.9 ^{②,③} 24.8 ^{②,③}	—	—	—
	38	—	—	—	—
		—	18.6 ^{②,③} 25.9 ^{②,③}	—	—
250	20.1 ^⑤	—	—	19.0 ^{②,⑤}	—
275	20.0 ^⑤	—	—	19.2 ^{②,⑤}	—
300	20.0 ^④	—	—	19.5 ^{②,④}	20.2 ^④
325	19.8 ^⑤	—	—	19.6 ^{②,⑥}	—
340	20.8 ^⑦	—	—	19.9 ^{②,⑦}	—
410	20.6 ^⑤	—	—	20.1 ^{②,⑤}	—

注: ① 火车站(长×宽×高为170 m×45 m×21 m)和机场航站楼(长×宽×高为650 m×82 m×20 m); NLOS情况下, 波束宽度为60°的发射天线设置高度为8 m, 波束宽度为10°的接收天线设置高度为1.5 m。
② LOS情况下的数据较高, NLOS情况下的数据较低。
③ 环境与②相同, 波束宽度为60°的发射天线设置高度为8 m, 全向接收天线设置高度为1.5 m。
④ 发射和接收天线的波束宽度为10°。
⑤ 发射和接收天线的波束宽度为8°。
⑥ 发射和接收天线的波束宽度为7°。
⑦ 发射和接收天线的波束宽度为9°。

表 5 不同室内场景和频率下穿透 j 层楼层时的穿透衰减因子 $L(j)$

Table 5 Penetration attenuation factors $L(j)$ for penetration through j -story floor slabs under different indoor scenarios and frequencies

频率/GHz	穿透 j 层楼层时的穿透衰减因子 $L(j)$			
	居民楼	办公室	商业楼	
0.9	—	9(1层) 19(2层) 24(3层)	—	
	1.8~2.0	4 j	14+4($j-1$)	6+3($j-1$)
		2.4	10 ^① (公寓) 5(别墅)	14
3.5	—	18(1层) 26(2层)	—	
	5.2	13 ^① (公寓) 7 ^② (别墅)	16(1层)	—
5.8	—	22(1层) 28(2层)	—	

注: ① 水泥墙。
② 木质墙。

2.6 ITU-R M.2412 InH 模型

ITU 的 5G 标准信道模型 ITU-R M.2412 中定义了适用于无线频段为 0.5~100 GHz、基站天线高度为 3~6 m、无线终端天线高度为 1~2.5 m、距离为 1~150 m 范围内办公楼和商场的室内场景^[22]。该模型分为室内频率分段模型(InH_A)和室内全频段模型(InH_B)。

2.6.1 InH_A 模型

在 LOS 电磁波传播时,阴影衰落标准差为 3 dB, InH_A 模型预测出的电磁波传播衰减可表示为

$$L_{\text{InH}_A\text{-LOS}} = \begin{cases} 16.9\lg(d/m) + 32.8 + 20\lg(f/\text{GHz}) \\ 0.5 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz} \\ 32.4 + 17.3\lg(d/m) + 20\lg(f/\text{GHz}) \\ 6 \text{ GHz} < f \leq 100 \text{ GHz} \end{cases} \quad (10)$$

在 NLOS 电磁波传播且 $0.5 \text{ GHz} \leq f \leq 6 \text{ GHz}$ 时,阴影衰落标准差为 4 dB, InH_A 模型预测出的电磁波传播衰减可表示为

$$L_{\text{InH}_A\text{-NLOS}} = 11.5 + 43.3\lg(d/m) + 20\lg(f/\text{GHz}) \quad (11)$$

在 NLOS 电磁波传播且 $6 \text{ GHz} < f \leq 100 \text{ GHz}$ 时, InH_A 模型预测出的电磁波传播衰减可表示为

$$L_{\text{InH}_A\text{-NLOS}} = \max(L_{\text{InH}_A\text{-LOS}}, L'_{\text{InH}_A\text{-NLOS}}) \quad (12)$$

式中 $L'_{\text{InH}_A\text{-NLOS}}$ 为阴影衰落标准差为 8.03 dB 时 InH_A 模型预测出的 NLOS 电磁波传播衰减, dB。

$$L'_{\text{InH}_A\text{-NLOS}} = 17.3 + 38.3\lg(d/m) + 24.9\lg(f/\text{GHz}) \quad (13)$$

2.6.2 InH_B 模型

在 LOS 电磁波传播时,阴影衰落标准差为 3 dB, InH_B 模型预测出的电磁波传播衰减可表示为

$$L_{\text{InH}_B\text{-LOS}} = 32.4 + 17.3\lg(d/m) + 20\lg(f/\text{GHz}) \quad (14)$$

在 NLOS 电磁波传播时, InH_B 模型预测出的电磁波传播衰减可表示为

$$L_{\text{InH}_B\text{-NLOS}} = \max(L_{\text{InH}_B\text{-LOS}}, L'_{\text{InH}_B\text{-NLOS}}) \quad (15)$$

式中 $L'_{\text{InH}_B\text{-NLOS}}$ 为阴影衰落标准差为 8.03 dB 时 InH_B 模型预测出的 NLOS 电磁波传播衰减, dB。

$$L'_{\text{InH}_B\text{-NLOS}} = 17.3 + 38.3\lg(d/m) + 24.9\lg(f/\text{GHz}) \quad (16)$$

3 室外-室内电磁波传播衰减统计模型

3.1 IMT-2000 O2I 模型

IMT-2000 O2I 模型适用于基站在室外、无线终端在室内的场景,其电磁波传播衰减可表示为自由

空间电磁波传播衰减、建筑物屋顶到街道的绕射传播衰减和通过多排建筑物的多屏绕射传播衰减的总和,该模型可表示为

$$L_{\text{IMT-O2I}} = -10\lg\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi d}}\right)^2 - 10\lg\left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r}\left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta}\right)^2\right] - 10\lg\left(\frac{l}{d}\right)^2 \quad (17)$$

式中: $L_{\text{IMT-O2I}}$ 为 IMT-2000 O2I 模型预测出的电磁波传播衰减, dB; λ 为波长, m; r 为无线终端与绕射边缘的直线距离, m; θ 为无线终端与绕射边缘之间的角度, rad; l 为成排建筑物之间的平均间隔, m。

$$r = \sqrt{(\Delta h_m)^2 + x^2} \quad (18)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{|\Delta h_m|}{x}\right) \quad (19)$$

式中: Δh_m 为建筑物平均高度与无线终端天线高度的差值, m; x 为无线终端与绕射边缘的水平距离, m。

3.2 ITU O2I 模型和 3GPP O2I 模型

5G 标准信道模型 3GPP TR 38.901 和 ITU-R M.2412 均定义了适用于基站在室外、无线终端在室内场景的 O2I 模型^[23-24],该模型可表示为

$$L_{\text{O2I}} = L_b + L_{\text{tw}} + L_{\text{in}} + X_\sigma \quad (20)$$

式中: L_{O2I} 为 ITU O2I 模型和 3GPP O2I 模型预测出的电磁波传播衰减, dB; L_b 为室外的电磁波传播衰减, dB; L_{tw} 为建筑物穿墙衰减, dB; L_{in} 为进入建筑物内的电磁波传播衰减, dB。

该模型将建筑物分为低衰减建筑物和高衰减建筑物。对于低衰减建筑物,该模型的阴影衰落标准差为 4.4 dB,建筑物穿墙衰减值为

$$L_{\text{tw}} = 5 - 10\lg\left(0.3 \times 10^{-\frac{2+0.2f}{10}} + 0.7 \times 10^{-\frac{5+4f}{10}}\right) \quad (21)$$

对于高衰减建筑物,该模型的阴影衰落标准差为 6.5 dB,建筑物穿墙衰减值为

$$L_{\text{tw}} = 5 - 10\lg\left(0.7 \times 10^{-\frac{23+0.3f}{10}} + 0.3 \times 10^{-\frac{5+4f}{10}}\right) \quad (22)$$

4 室内电磁波传播衰减统计模型用于矿井的可行性分析

矿井巷道长达 10 余千米^[25],轴向长度远大于断面宽度和高度,矿井电磁波传播为有限空间特殊环境中的远距离传播。巷道类型有长直、弯曲、分支、起伏等。巷道断面形状尺寸多样,有矩形、拱形、马

蹄形、梯形、圆形等。巷道中有胶轮车、电机车等运输车辆和设备。巷道中有电缆、水管和铁轨等纵向导体及工字钢等横向导体。掘进巷道有掘进机、掘锚一体机、带式输送机等。综采工作面有采煤机、液压支架、刮板输送机、转载机、破碎机、带式输送机等。运输巷有带式输送机等。

室内电磁波传播衰减统计模型的适用范围见表 6, 该模型一般适用于电磁波传播距离 ≤ 160 m 且地面室内为长方体的简单环境。矿井电磁波传播为有限空间特殊环境中远距离传播, 与地面室内长方体简单环境中近距离电磁波传播不同。

表 6 室内电磁波传播衰减统计模型的适用范围

Table 6 Scope of application of indoor electromagnetic wave propagation attenuation statistical model

室内电磁波传播衰减统计模型	适用范围
COST-Multi-Wall模型	适用于室内办公室场景
Keenan-Motley模型	适用于室内场景
WINNER II模型	适用于收发天线高度为1~2.5 m、距离为3~100 m范围内的室内办公室场景
3GPP InH-Office模型	适用于无线频段为0.5~100 GHz、距离为1~150 m范围内的室内场景
ITU-R P.1238模型	适用于办公室、商业楼、居民楼、工业场所、走廊等室内场景
ITU-R M.2412 InH模型	适用于无线频段为0.5~100 GHz、基站天线高度为3~6 m、无线终端天线高度为1~2.5 m、距离为1~150 m范围内的办公楼和商场等室内场景
IMT-2000 O2I模型、3GPP O2I模型、ITU O2I模型	适用于基站在室外、无线终端在室内的场景

室内-室内电磁波传播衰减统计模型中的 COST-Multi-Wall 模型、Keenan-Motley 模型考虑电磁波穿墙衰减。矿井巷道四周为较厚的煤岩, 对电磁波具有较强的吸收能力, 巷道支护材料进一步阻挡了电磁波穿透, 一般不考虑电磁波穿墙衰减。因此, 室内-室内电磁波传播衰减统计模型中的 COST-Multi-Wall 模型、Keenan-Motley 模型不适用于矿井。

IMT-2000 O2I, 3GPP O2I, ITU O2I 等室外-室内电磁波传播衰减统计模型适用于基站在室外开放空间、无线终端在室内有限空间的电磁波传播。矿井的基站和无线终端均在巷道内, 为有限空间内部电磁波传播。因此, 室外-室内电磁波传播衰减统计模型不适用于矿井。

5 室内电磁波传播衰减统计模型用于矿井误差分析

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 较大频率范围的矿井电磁波传播衰减测试, 现场测试所得数据集已在文献 [26] 中公开。本文基于该数据集, 计算辅助运输大巷(包括辅运大巷 1 和辅运大巷 2)、掘进巷道、拐弯巷道、分支巷道(包括主巷发射分支巷道和支巷发射分支巷道)、综采工作面(测量时为静态 LOS 电磁波传播)的电磁波传播衰减:

$$L_0 = P_t + G_t - \tau_t - P_r + G_r - \tau_r \quad (23)$$

式中: P_t 为发射功率, dBm; G_t 为发射天线增益, dB;

τ_t 为发射端的馈线衰减值, dB; P_r 为接收功率, dBm; G_r 为接收天线增益, dB; τ_r 为接收端的馈线衰减值, dB。

由前面分析可知, COST-Multi-Wall 模型、Keenan-Motley 模型、IMT-2000 O2I 模型、3GPP O2I 模型、ITU O2I 模型不适用于矿井。因此, 仅使用 WINNER II, 3GPP InH-Office, ITU-R P.1238, ITU-R M.2412 InH 等室内-室内电磁波传播衰减统计模型, 对矿井不同场景的电磁波传播衰减进行预测。在平直巷道、综采工作面中为 LOS 电磁波传播, 因此, 使用 WINNER II 模型、3GPP InH-Office 模型、ITU-R P.1238 模型、ITU-R M.2412 InH 模型中的 LOS 电磁波传播衰减统计模型, 对辅助运输大巷、掘进巷道、综采工作面中的电磁波传播衰减进行预测。在拐弯巷道、分支巷道中为 NLOS 电磁波传播, 因此, 使用 WINNER II 模型、3GPP InH-Office 模型、ITU-R P.1238 模型、ITU-R M.2412 InH 模型中的 NLOS 电磁波传播衰减统计模型, 对拐弯巷道、分支巷道中的电磁波传播衰减进行预测。

使用误差均值作为评价电磁波传播衰减统计模型预测精确度的指标, 误差均值可表示为

$$M = \frac{\left| \sum (L_{\text{predict}} - L_{\text{actual}}) \right|}{N} \quad (24)$$

式中: L_{predict} 为模型的预测值, dB; L_{actual} 为实测值, dB; N 为测试样本数据的总数。

使用式(24)对电磁波传播衰减统计模型在辅助

运输大巷、掘进巷道、拐弯巷道、分支巷道、综采工作面中的预测精度进行评估。不同电磁波传播衰减

统计模型在矿井不同场景的误差均值见表 7, 其曲线如图 2 所示。

表 7 不同电磁波传播衰减统计模型在矿井不同场景的误差均值

Table 7 Mean error values of different electromagnetic wave propagation attenuation statistical models under different mine scenarios

电磁波传播衰减统计模型	误差均值/dB							总的误差均值/dB
	辅运大巷1	辅运大巷2	掘进巷道	拐弯巷道	主巷发射分支巷道	支巷发射分支巷道	综采工作面	
WINNER II模型	6.8	8.3	8.5	11.6	8.1	10.8	11.4	9.3
3GPP InH-Office模型	5.7	8.1	9.4	7.8	5.9	7.2	13.7	8.2
ITU-R P.1238模型	6.2	8.9	12.0	7.6	10.6	8.4	15.7	9.9
ITU-R M.2412 InH模型	5.6	8.2	9.7	5.8	5.5	5.3	13.9	7.7

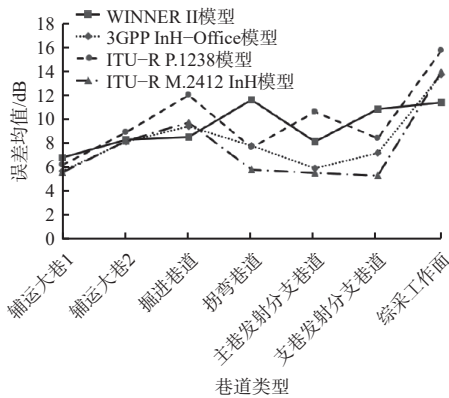


图 2 不同电磁波传播衰减统计模型在矿井不同场景的误差均值曲线

Fig. 2 Mean error curves of different electromagnetic wave propagation attenuation statistical models under different mine scenarios

由表 7 和图 2 可知, WINNER II, 3GPP InH-Office, ITU-R P.1238, ITU-R M.2412 InH 等室内电磁波传播衰减统计模型在矿井不同场景的误差均值不同。为了便于分析, 将同一模型在矿井不同场景中的误差取平均, 得到 WINNER II 模型、3GPP InH-Office 模型、ITU-R P.1238 模型、ITU-R M.2412 InH 模型预测矿井电磁波传播衰减时总的误差均值分别为 9.3, 8.2, 9.9, 7.7 dB, 由于预测误差较大, 这些模型不适用于矿井。这是因为室内电磁波传播衰减统计模型没有考虑矿井特殊环境对电磁波传播的影响。目前没有针对矿井特殊环境建立的矿井电磁波传播衰减统计模型。因此, 有必要针对矿井有限空间特殊环境, 研究建立矿井电磁波传播衰减统计模型, 指导基站及其天线的设计和布置。

6 结论

1) 矿井电磁波传播为有限空间特殊环境中远距离传播, 与地面室内长方体简单环境中近距离电磁波传播不同。

2) 矿井巷道四周为较厚的煤岩, 对电磁波具有较强的吸收能力, 巷道支护材料进一步阻挡了电磁

波穿透, 一般不考虑电磁波穿墙衰减。室内-室内电磁波传播衰减统计模型中的 COST-Multi-Wall 模型、Keenan-Motley 模型考虑电磁波穿墙衰减, 不适用于矿井。

3) 矿井的基站和无线终端均在巷道内, 为有限空间内部电磁波传播。室外-室内电磁波传播衰减统计模型适用于基站在室外开放空间、无线终端在室内有限空间的电磁波传播, 不适用于矿井。

4) 利用室内电磁波传播衰减统计模型中的 WINNER II 模型、3GPP InH-Office 模型、ITU-R P.1238 模型、ITU-R M.2412 InH 模型预测矿井电磁波传播衰减时, 总的误差均值分别为 9.3, 8.2, 9.9, 7.7 dB。由于预测误差较大, 这些模型不适用于矿井。

5) 目前没有专门针对矿井特殊环境建立的矿井电磁波传播衰减统计模型。因此, 有必要针对矿井有限空间特殊环境, 研究建立矿井电磁波传播衰减统计模型, 指导矿井基站及其天线的设计和布置。

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, 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.
- [4] 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].
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 艾渤, 熊磊, 官科, 等. 轨道交通电波传播与无线信道建模[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2018.
AI Bo, XIONG Lei, GUAN Ke, et al. Radio propagation and wireless channel modeling for rail traffic scenarios[M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Press, 2018.
- [15] MEHRNOUSH M, HU Chunyu, ALDANA C. AR/VR spectrum requirement for Wi-Fi 6E and beyond[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 133016-133026.
- [16] 张传福, 赵燕, 于新雁, 等. 5G 移动通信网络规划与设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
ZHANG Chuanfu, ZHAO Yan, YU Xinyan, et al. 5G mobile communication network planning and design[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2020.
- [17] 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].
- [18] 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].
- [19] 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].
- [20] 3GPP TR 38.901 Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (release 18)[S].
- [21] ITU-R P. 1238-12 Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz[S].
- [22] ITU-R M. 2412 Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020[S].
- [23] JIANG Tao, ZHANG Jianhua, TANG Pan, et al. 3GPP standardized 5G channel model for IIoT scenarios: a survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(11): 8799-8815.
- [24] WANG Yiwen, WANG Weimin, WU Yongle, et al. USRP-based multifrequency multiscenario channel measurements and modeling for 5G campus Internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(8): 13865-13883.
- [25] 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.
- [26] 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.