



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.09.018

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. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.09.018

## 矩形巷道载波频率对近场区分界点的影响

焦晓龙<sup>1</sup>,成凌飞<sup>2</sup>,张薇静<sup>1</sup>,陈 诺<sup>1</sup>

(1.河南理工大学 电气工程与自动化学院,河南 焦作 454000;2.河南理工大学 物理与电子信息学院,河南 焦作 454000)

**摘 要:**在矿井巷道、地铁隧道等类似限定空间中的通信受巷道壁粗糙度、电导率、空气湿度等因素影响,与地面上通信相比有着较大差别。精确描述限定空间中(矿井巷道)的通信,对其通信调度至关重要。基于分段思想对巷道电磁波传播特性进行了研究,将电磁波传播区域分为自由空间区、多模传播区、基模传播区、极远区,得到近场区电磁波传播机制的分界点,有助于实现对巷道电磁波传播机制的预测。在研究矩形巷道中电磁波传播机制分界点时,针对4种典型尺寸的巷道,通过不同巷道载波频率变化试验的测量及电磁仿真软件 Wireless Insite 建立巷道电磁波传播模型,改变传输频率得出不同的试验结果。结果表明:在矩形巷道中载波频率为 900~2 700 MHz 条件下,随着收发天线载波频率的增大,电磁波在近场区中的分界点值逐渐减小,受安装天线极化作用影响较小。

**关键词:**矩形巷道;近场区分界点;载波频率;电磁波

中图分类号:TD65

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)09-0124-05

## Influence of carrier frequency on demarcation points of near field in rectangular roadway

JIAO Xiaolong<sup>1</sup>, CHENG Lingfei<sup>2</sup>, ZHANG Weijing<sup>1</sup>, CHEN Nuo<sup>1</sup>

(1.School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 455000, China;

2.School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 455000, China)

**Abstract:** Communication in mine roadways, subway tunnels and other similar restricted space is greatly affected by factors such as wall roughness, electrical conductivity, air humidity and other factors. Compared with ground communication, there is a big difference. Therefore, it is very important to accurately describe the communication in the restricted space. Based on the segmentation idea, the electromagnetic wave propagation characteristics in the roadway were studied, and the electromagnetic wave propagation area is divided into free space area, multimode propagation area, fundamental mode propagation area, and extreme far area. It is helpful to obtain the demarcation point of electromagnetic wave propagation mechanism in the near field area to realize the prediction of the electromagnetic wave propagation mechanism in the tunnel. When studying the demarcation point of electromagnetic wave propagation mechanism in rectangular roadways, aiming at 4 types of roadways of typical sizes, electromagnetic wave propagation models in the roadway were established through measurement of different roadway frequency variations and electromagnetic simulation software Wireless Insite, and different results were obtained by changing the transmission frequency to obtain the received power. The results show that in the rectangular roadway, when the carrier frequency is from 900 MHz to 2 700 MHz, with the increase of the carrier frequency of the transceiver antenna, the demarcation point value of the electromagnetic wave in the near-field region gradually decreases, which is less affected by the polarization of the installed antenna.

**Key words:** rectangular roadway; demarcation points of near field; carrier frequency; electromagnetic wave

## 0 引 言

地下通信(矿井巷道、地铁隧道、公路隧道、人防通道等)异于地面通信<sup>[1-2]</sup>,由于地下空间受限,

电磁波受传播频率、巷道壁粗糙度、巷道内空气湿度等因素的影响而呈现出比较复杂的传播特征,与地面上的无线电波传播差别很大。因此,精确描述巷道中电磁波传播特性,并对巷道中电磁波传播区进

收稿日期:2021-02-25;责任编辑:李金松

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51244003);河南省高等学校矿山信息化重点学科开放实验室开放基金资助项目(Kz2012-01)

作者简介:焦晓龙(1993—),男,河南三门峡人,硕士。E-mail:18303986808@163.com

行分段研究,确定每个传播区域的分界点,对巷道内通信<sup>[3-4]</sup>、调度、安全监测<sup>[5]</sup>来说十分重要。

1975年,EMSLIE<sup>[6]</sup>分析了信号漫射散射成分、拐弯、天线极化方向和插入损耗等对矿井巷道中信号衰减的影响,并推导了矿井隧道中特高频无线电波的衰减公式。HOWARD<sup>[7]</sup>研究了微蜂窝和个人通信系统在视距条件下的无线传播特性,首次提出了双斜线预测模型。随后HROVAT<sup>[8]</sup>提出了在400 MHz下巷道中四斜率信道模型的预测,将双斜线预测模型扩展为四斜线预测模型,即用自由空间区、近场区、远场区、极远区4个区域来描述电磁波传播特性。张跃平等<sup>[9-12]</sup>运用Fresnel区域理论,提出了近场区的自由空间传播模型和远场区修正的波导传播模型,得到了“断点”概念;随后又通过巷道试验验证了新的巷道混合模型来电磁波的传播衰减特性,再次证明了电磁波传播近场区存在分界点<sup>[13-15]</sup>。官科等<sup>[16-18]</sup>在前人研究的基础上,分析了隧道中存在小车等移动障碍物的情况:若障碍物较小,预测模型可分为自由空间、多模波导、远场等区域;若障碍物尺寸和巷道横截面尺寸相近,自由空间区将被阴影效应区所代替,接下来将是多模波导传播区、远场区;并采用空间立体几何和非涅耳区传播理论,推导出了收发天线在等高条件下的分界点公式,并在矩形巷道、圆形巷道进行了应用。

上述文献对分界点的研究,只考虑了收发天线安装方式等高对电磁波传输过程的影响,并没有考虑天线的极化方式,天线的选型以及载波频率的变化。笔者将电磁波在自由空间传播的损耗作为入手点,通过仿真分析和试验测量得出了天线极化方式、载波频率对近场区分界点的影响。

## 1 电磁波的传播模型

### 1.1 近场区分界点的划分

根据文献[8,18],限定空间中电磁波传播主要分为近场区和远场区,近场区可细分为自由空间区和多模传播区,远场区则分为低次模传播区和极远区。当收发天线距离很近时,电磁波在巷道中没有反射,只有直射,与地面通信相似,符合近场区前半段的自由空间区传播模型。随着接收天线逐渐远离发射天线,电磁波存在多种模式并快速衰减,信号波动较大,进入多模传播区;在远场区,伴随着高次模的衰减,电磁波传播主要以基模为主导进行传播,信号波动明显比较缓和。当发射天线与接收天线距离非常大时,也就是所谓的极远区,波导效应(甚至是基模波导)会由于反射波的衰减而消失,因此再次

服从自由空间传播模型。笔者研究的是近场区中自由空间区与多模传播区之间的分界点。

根据电磁波传播理论,菲涅耳区<sup>[19]</sup>是以收发天线为焦点的椭球体,在菲涅耳区内,电磁波主要进行直射,以自由空间形式进行传播。随着收发天线的距离变大,菲涅耳区域也逐渐变大,直至与巷道壁相切,此时自由空间传播结束,而电磁波通过巷道壁产生大量的发射波,可以认为是高次模。因此,菲涅耳区与巷道壁相切的地方可以认为是电磁波自由空间传播的结束点和多模传播的起点,即近场区中电磁波传播的分界点。

### 1.2 自由空间传播

自由空间是一种理想的电磁波传播空间,在自由空间中电磁波只进行直射,而不会发生反射、衍射、折射等现象。电磁波的功率密度会在传播过程中不断衰减,菲涅耳自由空间传播方程为

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{4\pi^2 d^2} \quad (1)$$

式中: $P_t$ 、 $P_r$ 分别为发射天线的发射功率和接收天线的信号接收功率; $G_t$ 、 $G_r$ 分别为发射天线和接收天线的增益系数; $\lambda$ 为载波波长; $d$ 为发射天线和接收天线之间的距离。

在实际通信工程中,就自由空间的传播来说,电磁波的衰减程度可以用自由空间的传播损耗来表示。当发射天线和接收天线的增益系数均为1时,将发射天线的发射功率和接收天线的信号接收功率比值,记为 $P_L$ ,则

$$P_L = 10 \lg \frac{P_t}{P_r} = -10 \lg \frac{\lambda^2}{4\pi^2 d^2} \quad (2)$$

## 2 试验验证与分析

### 2.1 测试巷道1的试验与分析

为验证载波频率、天线安装极化方式对近场区分界点的影响,在焦作市某地下走廊进行了试验。该走廊长140 m、宽5.5 m、高4.8 m,通道壁由混凝土构成,底部铺有大理石地板,顶部布满镂空金属框架,天然气管道与照明设备,走廊一侧有4个防空门,用于隔断其他分支。试验仪器包括安捷伦N9310A射频信号发生器、N93004B手持式射频频谱分析仪和棒状偶极子天线。

将收发天线都置于通道截面中心处,在接收天线沿通道远离发射天线的过程中,假设收发天线之间距离为 $Z_r$ ,在 $0 < Z_r < 6$  m时,收发天线每隔0.6 m记录1次数据;在 $6 \text{ m} < Z_r < 30$  m时,每隔1.2 m记录1次数据;30 m  $< Z_r < 60$  m时,每隔3 m记录1次数据

据;最后, $Z_r > 60$  m 时,每隔 4.8 m 记录 1 次数据。为保证试验所得模型的准确性,若接收装置在某一点的信号强度有明显大跳动时,通过稍微局部移动,记录最稳定的信号强度。另外,在走廊中要保证收、发装置之间没有大的障碍物阻挡电磁波的传播。

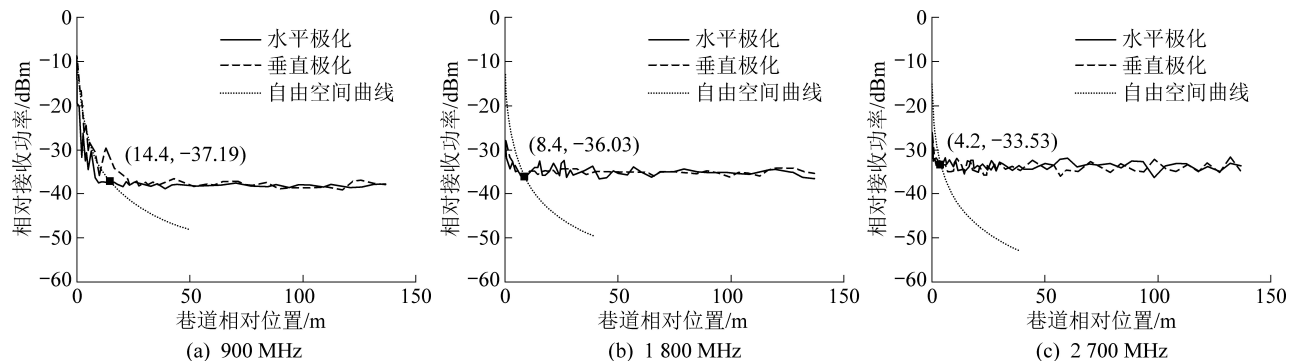


图 1 巷道 1 不同频率下接收天线的相对接收功率曲线

Fig.1 Relative receiving power curves of receiving antenna at different frequencies in Tunnel 1

在图 1 中,实线代表水平极化模式下接收天线的接收功率,虚线代表垂直极化模式下接收天线的接收功率,点划线代表由式(2)得到的自由空间传播接收功率曲线。由于接收天线的接收功率上下波动比较稳定,因此可以认为自由空间曲线与接收功率的交点即近场区的分界点。

由图 1 可知,收发天线载波频率为 900 MHz 时,近场区分界点为 14.4 m;收发天线载波频率为 1 800 MHz 时,电磁波在近场区分界点为 8.4 m;收发天线载波频率为 2 700 MHz 时,分界点为 4.2 m。由此可见,随着收发天线载波频率的不断增大,近场区分界点距离不断减小。近场区分界点受天线极化作用影响不大。随着载波频率的不断增大,近场区分界点之后的相对接收功率上下波动变化越来越快。

综上所述,随着收发天线载波频率的不断增大,近场区分界点距离不断减小。这可能是因为随着载波频率的增加,根据波导理论,波导在不同模式中传播产生同向叠加和反向相消的加强点和减弱点,又由于载波频率增加导致高次模数量增加,从而近场区加强点和减弱点变化较快,多模传播区提前到来,自由空间区的距离变得越来越小。

为进一步验证试验结论的普遍性,另外又选取了 3 种不同巷道,根据巷道截面尺寸,对巷道类型进行定义,假设巷道截面宽度为  $a$ ,高度为  $b$ ,用  $\tau = a/b$  表示巷道横截面宽度与高度之比,来定义巷道的宽窄类型,试验巷道 1 的宽度为 5.5 m,高度为 4.8 m,  $1.0 < \tau < 1.2$ 。4 种类型的矩形巷道参数见表 1。

在测量过程中,通过改变收发天线的极化方式 ( $H-H, V-V$ ),以及收发装置的载波频率 (900、1 800、2 700 MHz),得到接收天线的相对接收功率。将每组记录的试验数据通过 MATLAB 工具绘制成折线图,如图 1 所示。

表 1 4 种巷道类型的尺寸参数

Table 1 Dimensional parameters of four types of tunnels

巷道	宽×高/(m×m)	宽窄类型	备注
1	5.50×4.80	$1.0 < \tau < 1.2$	宽略大于高
2	2.50×2.75	$1.0 < 1/\tau < 1.2$	高略大于宽
3	8.14×3.00	$\tau > 2.0$	宽远大于高
4	2.50×6.00	$1/\tau > 2.0$	高远大于宽

## 2.2 测试巷道 2 的试验与分析

测试巷道 2 为河南理工大学某大楼的走廊通道,走廊长 87.00 m、宽为 2.50 m、高为 2.75 m,走廊中发射天线与接收天线之间无较大障碍物,无人员走动,接近理想巷道。巷道 2 采取与巷道 1 同样的试验方法,收发天线位于通道截面中心处,由于巷道 1 已经证明天线极化方式对近场区分界点没有太大的影响,因此在巷道中只采用垂直极化方式在不同频率的情况下进行试验,巷道 2 不同频率下接收天线的相对接收功率曲线如图 2 所示。由图 2 可知,当载波频率为 900 MHz 时,近场区分界点为 9.6 m;当载波频率为 1 800 MHz 时,电磁波在近场区分界点为 6.6 m;当载波频率为 2 700 MHz 时,近场区分界点为 3.6 m。随着收发天线载波频率的不断增大,近场区分界点距离不断减小。

## 2.3 测试巷道 3 的试验与分析

测试巷道 3 为焦作市某防空洞,该通道宽 8.14 m、高 3 m,通道壁由混凝土构成,底部铺有大理石地板,符合试验条件。巷道 3 采取同样的试验方法,收发天线位于通道截面中心处,测量在不同频率的情况下接收天线的接收功率变化,巷道 3 不同频率下接收天线的相对接收功率曲线如图 3 所示。



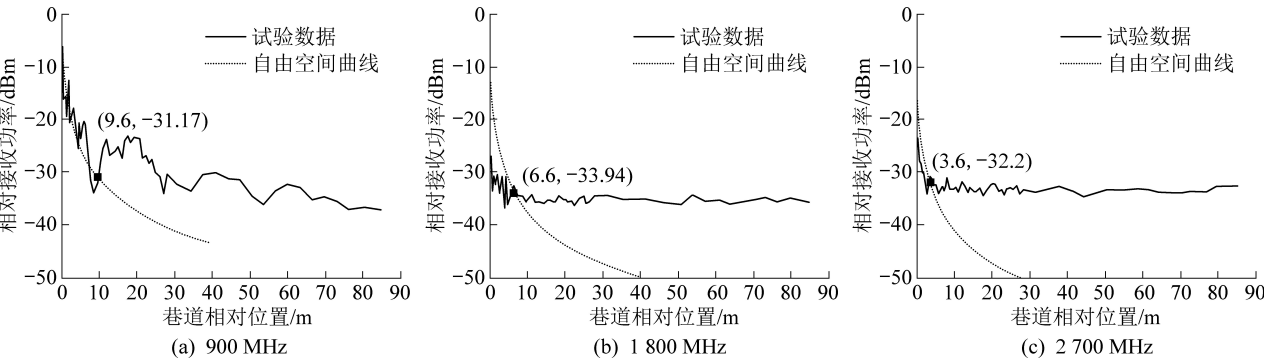


图 2 巷道 2 不同频率下接收天线的相对接收功率曲线  
Fig.2 Relative receiving power curve of receiving antenna at different frequencies in Tunnel 2

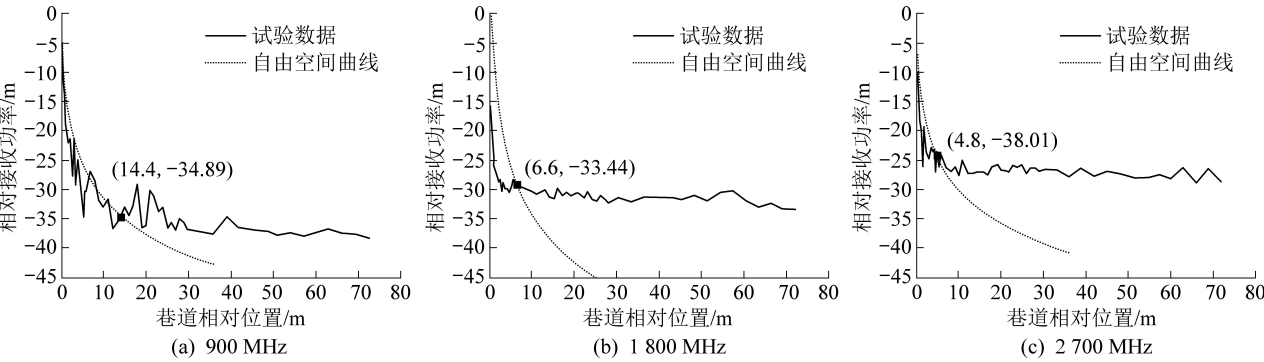


图 3 巷道 3 不同频率下接收天线的相对接收功率曲线  
Fig.3 Relative receiving power curve of receiving antenna at different frequencies in Tunnel 3

由图 3 可知,当载波频率为 900 MHz 时,近场区分界点值为 14.4 m;当载波频率为 1 800 MHz 时,电磁波在近场区分界点值为 6.6 m;当载波频率为 2 700 MHz 时,近场区分界点值为 4.8 m。随着收发天线载波频率的不断增加,近场区分界点距离不断减小,而且分界点减小的速率越来越小。

2.4 巷道 4 的仿真与分析

目前未找到此种类型的巷道,采用 Wireless Insite 软件对巷道尺寸进行建模仿真,得到接收天线相对接收功率随距离变化曲线,巷道 4 仿真参数如下:

发射功率/dBm	20
墙体相对介电常数/( $F \cdot m^{-1}$ )	7
电导率/( $S \cdot m^{-1}$ )	0.02
反射次数	6
绕射次数	1
墙体厚度/m	0.3
隧道宽度/m	2.5
隧道高度/m	6

仿真模拟时,将收发天线均固定于巷道截面中心位置,每隔 0.5 m 收集 1 次数据。根据天线载波频率不同,天线均为半波偶极子天线,进行 3 组仿真,得到仿真结果如图 4 所示。

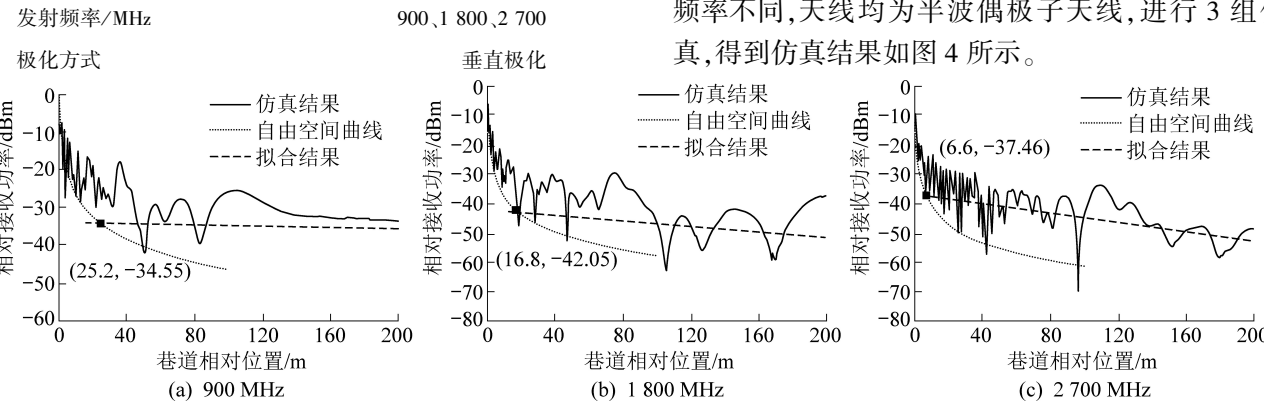


图 4 巷道 4 不同频率下接收天线的相对接收功率曲线  
Fig.4 Relative receiving power curve of receiving antenna at different frequencies in Tunnel 4

由图 4 可知,虚线为近场区多模传播区的拟合结果,高次模传播区拟合直线与自由空间曲线的交点为近场区的分界点。当载波频率为 900 MHz 时,近场区分界点值为 25.2 m;当载波频率为 1 800 MHz 时,电磁波在近场区分界点值为 16.8 m;当载波频率为 2 700 MHz 时,分界点值为 6.6 m。随着收发天线载波频率的不断增大,近场区分界点距离不断减小。仿真结果与试验结果会有一定的误差,这可能是由于实测环境中各种因素(如气体、粗糙度、粉尘等)影响了电磁波的传播,造成了一定的差异。但是仿真结果与其他 3 种巷道试验接收功率变化趋势大致相同,说明仿真模拟结果有一定参考价值。

### 3 结 论

1) 在通信范围(载波频率为 900~2 700 MHz)内,随着收发天线载波频率的增加,高次模数量随之增加,导致电磁波在近场区中的分界点变得越来越小。

2) 天线极化模式对自由空间中电磁波传播的影响很小。因此,矩形巷道中电磁波在近场区的分界点受天线极化作用的影响可以忽略不计。

3) 随着电磁波在矩形巷道中载波频率的增加,电磁波反射的部分不断增加,主要是较高次模式阶数不断增加以及高次模共同作用的结果,导致多模传播区提前到来。

### 参考文献(References):

- [1] 王 军,李少谦. 认知无线电:原理、技术与发展趋势[J]. 中兴通讯技术,2007(3):1-4.  
WANG Jun, LI Shaoqian. Cognitive radio: principles, techniques and trends [J]. ZTE Communications, 2007(3):1-4.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220.
- [3] 温学雷. 煤矿井下应急救援超前探测发射装置设计研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8):164-168.  
WEN Xuelei. Design and research of advanced detection launching device for underground coal mine emergency rescue[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8):164-168.
- [4] 鲍文亮. 基于特征地图的煤矿辅助运输车辆定位方法[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5):115-119.  
BAO Wenliang. Localization method for auxiliary transport vehicles of coal mine based on feature map[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5):115-119.
- [5] 田宏亮,张 阳,郝世俊,等. 矿山灾害应急救援通道快速安全构建技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5):29-33.  
TIAN Hongliang, ZHANG Yang, HAO Shijun, et al. Technology and equipment for rapid safety construction of emergency rescue channel after mine disaster [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(5):29-33.
- [6] EMSLIE A, LAGACE R, STRONG P. Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1975, 23(2):192-205.
- [7] XIA H H, BERTONI H L, MACIEL L R, et al. Radio propagation characteristics for line-of-sight microcellular and personal communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(10):1439-1446.
- [8] HROVAT A, KANGT G, JANORNIT T. Four-slope channel model for path loss prediction in tunnels at 400 MHz[J]. IET Micro-waves, Antennas & Propagation, 2010, 4(5):571-582.
- [9] ZHANG Y P, Ng T, SHENG J, et al. A hybrid model for propagation loss prediction in tunnels[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 52(5):1308-1314.
- [10] HWANG Y, ZHANG Y P, KOUYOUJIAN R G. Ray-optical prediction of radio-wave propagation characteristics in tunnel environments. Part one: Theory[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(9):1328-1336.
- [11] ZHANG Y P, HWANG Y, KOUYOUJIAN R G. Ray-optical prediction of radio-wave propagation characteristics in tunnel environments. Part two: Analysis and measurements [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(9):1337-1345.
- [12] ZHANG Y P, ZHENG G X, SHENG J H. Radio propagation at 900 MHz in underground coal mines[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(5):757-762.
- [13] 张跃平, 张文梅, 盛剑桓, 等. 900 MHz 无线电波在地下长壁煤矿的传播[J]. 煤炭学报, 2002, 37(1):83-87.  
ZHANG Yueping, ZHANG Wenmei, SHENG Jianxi, et al. Propagation of 900 MHz radio waves in underground longwall coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 37(1):83-87.
- [14] 张跃平, 张文梅, 郑国莘, 等. 预测隧道中传播损耗的混合模型[J]. 电子学报, 2001(9):1283-1286.  
ZHANG Yueping, ZHANG Wenmei, ZHANG Guobiao, et al. A hybrid model for predicting propagation loss in tunnels[J]. Chinese Journal of Electronics, 2001(9):1283-1286.
- [15] ZHANG Y P, WANG H Y, SHENG J H. Propagation characteristics of UHF simulcast signals in tunnel environments; Proceedings of International Conference on Communication Technology. ICCT '96, 1996[C]. IEEE, 1996.
- [16] GUAN K, ZHONG Z, AI B, et al. Modeling of the division point of different propagation mechanisms in the near-region within arched tunnels[J]. Wireless Personal Communications, 2013, 68(3):489-505.
- [17] GUAN K, ZHONG Z, AI B, et al. Propagation mechanism modeling in the near-region of arbitrary cross-sectional tunnels[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2012.
- [18] 官 科. 轨道交通场景电波传播建模理论与方法研究[D]. 北京交通大学, 2014.
- [19] 邹高翔, 童创明, 王 童, 等. 空间与地面菲涅尔区的特性研究[J]. 弹箭与制导学报, 2017(1):129-134.  
ZOU Gaoxiang, TONG Chuangming, WANG Tong, et al. Study on the characteristics of space and ground Fresnel zone[J]. Journal of Projectiles, Archery and Guidance, 2017(1):129-134.