

## 电磁波在传送带巷道中传播的实验分析\*

史亚军<sup>1</sup> 成凌飞<sup>2</sup> 曾文<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000;

2. 河南理工大学物理与电子信息学院 焦作 454000)

**摘要:** 矿井巷道中不可避免存在机车、长列传送带、罐笼和金属支护等物体,这些物体的存在一定程度上影响了巷道中电磁波的传播。将巷道看作波导,通过实验测量和拟合的方法,研究电磁波在传送带巷道中的衰减。实验结果表明:电磁波的衰减与长列传送带的存在和接收频率有关;传送带的存在使电磁波的衰减增大;电磁波的频率越高,衰减越小;900 MHz是研究矿井无线通信的最佳频率;在宽度大于高度的巷道中,H-H模式比V-V模式更适合做通信方式。结论为煤矿井下巷道无线通信提供更有力的支持,对未来进一步研究巷道中电磁波的传播提供参考价值和现实指导意义。

**关键词:** 矩形巷道;传送带;电磁波;传播特性;衰减

**中图分类号:** TN929.4    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1015

Experimental analysis of electromagnetic wave propagation  
in conveyor belt roadwayShi Yajun<sup>1</sup> Cheng Lingfei<sup>2</sup> Zeng Wen<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Unavoidably, mining tunnels have locomotives, long conveyor belts, cages, metal mesh supporting and so on these objects. The existence of these objects affects electromagnetic wave propagation in tunnels to some extent. The text regards the tunnel as a waveguide, through experimental measurement and fitting method to study on attenuation of electromagnetic wave in conveyor belt roadway. The experimental results show that: the attenuation of the electromagnetic wave is connected with the existence of long conveyor belts and the received frequency; The existence of conveyor belts increases the attenuation of the electromagnetic wave; the higher the frequency of the electromagnetic wave is, the smaller the attenuation is; 900 MHz is the optimum frequency to study mine wireless communication; In the roadway with width greater than height, horizontal mode is more suitable for communication than vertical mode. The results in this paper provide more powerful support for the coal mine roadway wireless communication, and provide reference value and practical significance for the further study of the electromagnetic wave propagation characteristics.

**Keywords:** rectangle tunnel; conveyor belts; electromagnetic wave; propagation characteristics; attenuation

## 0 引言

在矿井巷道这种复杂又特殊的受限空间中,电磁波的传播不可避免地要受到各种障碍物的影响,比如机车矿车、长列传送带、粗糙度、人群、金属支护立柱、风门等,从而导致电磁波传播特性的复杂性<sup>[1]</sup>。国内学者在相关障碍物方面做了一些理论研究和测试分析工作。孙继平等人<sup>[2]</sup>用有限元法研究了梯形隧道中横截面尺寸对电磁波传播特性的影响,结果表明:梯形隧道中上边宽度、下边宽度和高度的

增大会使电磁波截止频率降低,在隧道下边宽度增加或者高度减小的情况下会得到较大的通信带宽。王弘刚等人<sup>[3]</sup>用模式传输线理论研究了实心砖墙对电磁波的衰减特性,研究表明:在频率为2~8 GHz时,实心砖墙对电磁波的衰减为15~25 dB。张传雷等人<sup>[4]</sup>曾经用模式匹配法和多波模理论研究了金属支护立柱对巷道无线传输特性的影响,结果表明:随着频率的增加或支护立柱排数的增加,矩形巷道中均匀区域的TE<sub>10</sub>基模电压反射系数增大。姚善化等人<sup>[5]</sup>研究了矿井巷道壁粗糙度对电磁波传播损耗的影响,

收稿日期:2017-02

\* 基金项目:国家自然科学基金(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(Kz2012-01)资助项目

结果表明:在低频段粗糙度损耗对电磁波传播损耗的影响较大;随着粗糙度增加,粗糙损耗明显增大。潘涛等人<sup>[6]</sup>研究了煤矿巷道中粉尘对电磁波传播特性的影响,结果表明随着粉尘浓度的增大,衰减在增大。

煤矿安全工程规定井下电气设备必须满足防爆要求,绝大多数电磁波信号测量设备并不满足防爆要求,因此无法在真实煤矿井下做相关实验。

传送带是煤矿运输和生产的重要工具,为了研究传送带对电磁波传播的影响,本次实验在煤矿模拟巷道中进行,通过实验测量和拟合<sup>[7-8]</sup>的方法,将测得数据处理和分析并得出结论,这为煤矿井下巷道电磁波的传播提供一定的理论支持和指导意义。

## 1 测量实验

### 1.1 测试环境及设备

本次测量是在山西运城职业技术学院的教学模拟巷道中进行的,选取了两种截面形状、尺寸相同的巷道:一种是空巷道。另一种是传送带巷道。其中巷道长约100 m,宽约4 m,高约2.8 m,巷道壁由混凝土构成,巷道顶部装有通风管、静压洒水管、电力线、通信线以及隔爆水袋。传送带紧挨巷道一侧,长约90 m,宽1.6 m,高约0.8 m,如图1所示。



图1 实验环境

为了更加准确描述巷道的位置,巷道模型采用直角坐标系: $x$ 轴表示巷道宽, $y$ 轴表示巷道高, $z$ 轴表示巷道长。假设以巷宽的中点为原点,坐标记为 $(0,0,0)$ ,发射天线坐标 $P_t(x_t, y_t, z_t)$ ,接收天线坐标 $P_r(x_r, y_r, z_r)$ 。

实验设备主要包括安捷伦N9310A射频信号发生器、安捷伦N9340B手持式射频频谱分析仪和棒状偶极子接收/发射天线。

### 1.2 测试步骤

1)将发射天线 $P_t$ 、接收天线 $P_r$ 分别与信号发生器和频谱分析仪连接,打开信号频谱分析仪。

2)将发射天线 $P_t$ 固定在巷顶 $(0,2.8,0)$ 位置,打开信号发生器,调制发射频率,发射功率强度为20 dB。接着把接收天线逐渐远离发射天线,同时记录接收信号的数值。

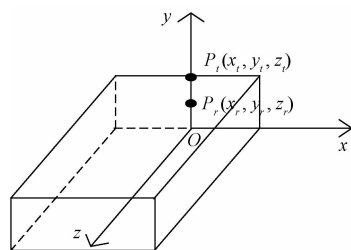


图2 矩形巷道模型

在与发射天线较近的区域内信号衰减速度较快,所以选择每2 m测量一次。通过改变传播频率和天线的方向,分别记录不同频率和不同极化方式时的数据。

## 2 实验与分析

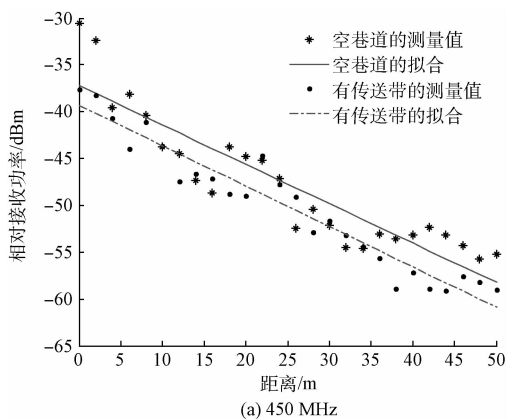
本文主要从两个方面研究电磁波对传送带巷道电磁波衰减特性的影响,传播频率和天线的极化方式<sup>[9-10]</sup>。

传播频率为450 MHz、900 MHz、1 800 MHz;

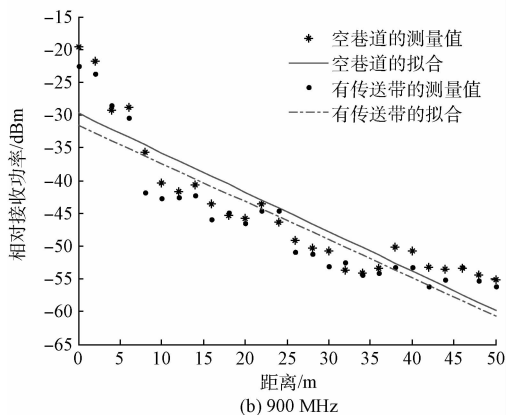
极化方式:根据接收-发射天线方向的不同,把极化分为4种:垂直-垂直(V-V)、水平-水平(H-H)、垂直-水平(V-H)、水平-垂直(H-V)。

### 2.1 传播频率的影响

发射天线 $P_t$ 位于 $(0,2.8,0)$ ,接收天线 $P_r$ 位于 $(0,1.4,z)$ ,V-V极化方式,在不同频率下,分别测得空巷道和有传送带巷道的实验结果如图3所示。



(a) 450 MHz



(b) 900 MHz

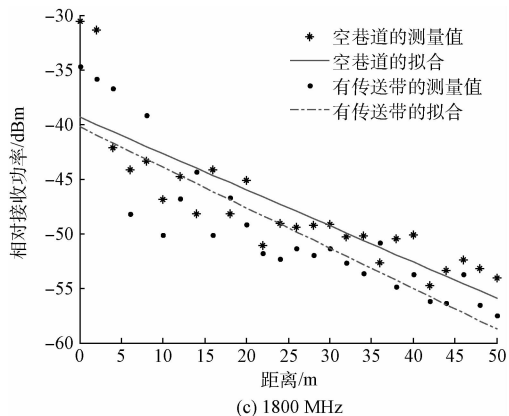


图 3 频率对信号接收功率的影响

从图 3 可以看出:当接收频率为 450 MHz 时,空巷道中电磁波的接收功率明显高于传送带巷道中的接收功率;当接收频率为 900 MHz 时,两种巷道的接收功率比较接近;当接收频率为 1 800 MHz 时,在近场区<sup>[11]</sup>,空巷道中电磁波接收功率稍微高于传送带巷道中的接收功率,而在远场区,空巷道中的信号接收功率明显高于传送带巷道的信号接收功率,有传送带巷道的信号接收功率急剧下降。

空巷道和传送带巷道中,3 种传播频率的电磁波接收功率的二次拟合曲线分别如图 4、图 5 所示。显然,无论是在空巷道,还是在传送带巷道,900 MHz 的信号接收功率都是最高的,尤其是在近场区,明显高于其他两种传播频率。

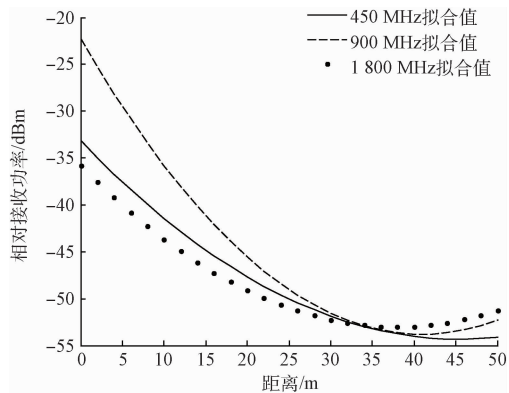


图 4 在空巷道中,3 种频率下的实验结果

通过分析,可以得出以下结论:

1) 在不同频率下,空巷道的信号接收功率拟合线在有传送带巷道的信号接收功率拟合线的上方,说明有传送带巷道的信号接收功率比空巷道的接收功率小,信号衰减较大。

2) 随着频率的增加,空巷道和有传送带巷道的相对接收功率都是先升高再降低,在 900 MHz 时接收功率最大,衰减最小,这说明 900 MHz 频率的电磁波更加适合做矿井巷道无线通信,同时验证了文献[12]。

3) 在近场区,频率为 900 MHz 时衰减比较明显,在远场区,各个频率的衰减比较平缓。

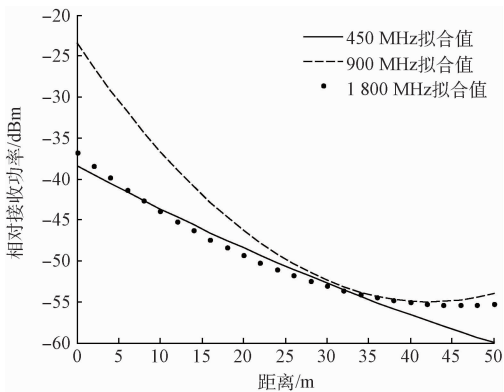
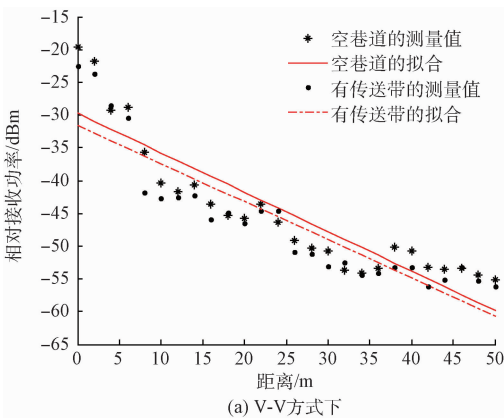


图 5 在传送带巷道中,3 种频率下的实验结果

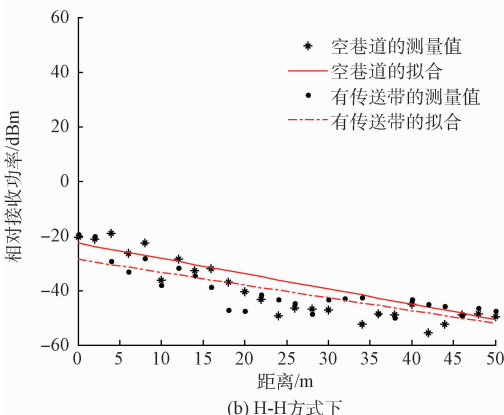
### 2.2 极化方式的影响

当  $f=900\text{ MHz}$ ,发射天线、接收天线分别位于  $P_t(0, 2.8, 0)$ ,  $P_r(0, 1.4, z)$  时,在不同极化方式(V-V, H-H, V-H, H-V)下,分别测得空巷道和有传送带巷道的实验结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,当极化为 V-V 方式时,在近场区,空巷道的信号接收功率稍高于传送带巷道中的接收功率,在远场区,两者的接收功率差距越来越小;无论是在空巷道,还是在传送带巷道,H-H 方式的接收功率都是最高的;V-H 和 H-V 极化的接收功率较小,空巷道中电磁波接收功率明显高于传送带巷道中的接收功率,并且两种极化方式的



(a) V-V 方式下



(b) H-H 方式下

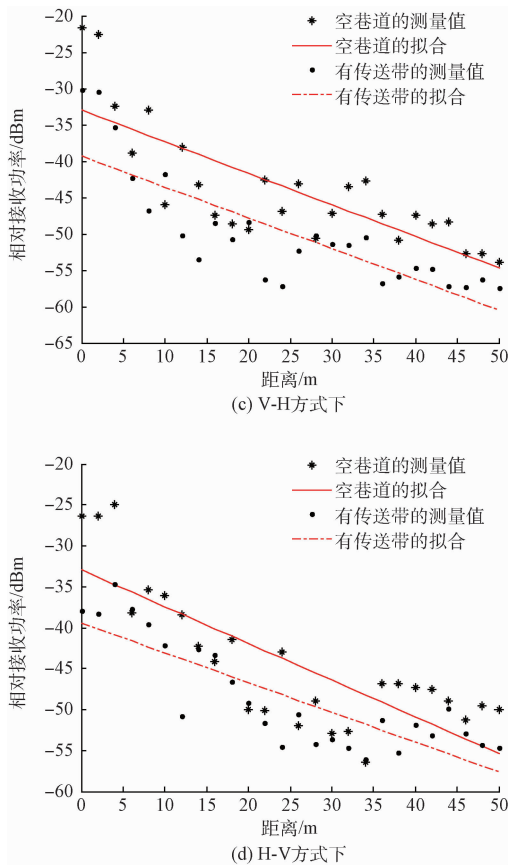


图6 极化方式对信号接收功率的影响

功率大小基本相同。

通过分析,可以得出以下结论:

1)无论是何种极化方式,空巷道和有传送带巷道的信号接收功率与距离的变化规律都是随着距离的增加而减小,距离发射天线越远,信号衰减越大。从整体上看,传送带巷道的信号衰减比空巷道的信号衰减大一些。

2)V-V极化和H-H极化对两种巷道电磁波传播的衰减影响比较平缓,V-H极化和H-V极化对两种巷道电磁波传播的衰减影响比较明显,约差6 dBm。

3)H-H模式的衰减最小,V-H和H-V模式的衰减率的衰减较大。因此,在宽度大于高度的矿井巷道中测量电磁波传播的衰减特性时,更适合选取H-H水平极化方式的的天线做研究,此实验结果验证了文献[13]。

### 3 结 论

本文主要介绍电磁波在传送带巷道中传播的实验分析,通过实验测量和拟合的方法,研究电磁波的衰减特性,得到以下结论:电磁波的衰减与长列传送带的存在和接收频率有关,传送带的存在使电磁波的衰减增大;电磁波的频率越高,衰减越小;在近场区,频率为900 MHz时的衰减比较明显,在远场区,各个频率的衰减变化相对稳定。有传送

带巷道的衰减比空巷道的衰减稍微大一些;900 MHz 是更适合做矿井巷道无线通信的频段;V-H和H-V极化对两种巷道电磁波的衰减影响比较明显;在宽度大于高度的矩形巷道中,H-H模式比H-V模式更适合做通信方式。所得结论为煤矿巷道电磁波的传播提供理论支持和实际指导意义。

### 参考文献

- [1] BRENNAN C, TRINH D, PHAM V, et al. Full-wave analysis of electromagnetic wave propagation over terrain using the improved tabulated interaction method[J]. *Radio Science*, 2015, 50(5):355-364.
- [2] 孙继平,张传雷. 梯形隧道中横截面尺寸对电磁波传播特性的影响[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(8): 1504-1507.
- [3] 王弘刚,张存波,张建德. 实心砖墙对电磁波的衰减特性[J]. *强激光与离子束*, 2013, 25(9): 2373-2377.
- [4] 张传雷,孙继平,刘珺. 金属支护立柱对巷道无线传输特性的影响[J]. *电子科技大学学报*, 2007, 36(2): 227-229.
- [5] 姚善化,吴先良,张量. 矿井巷道壁粗糙度对电磁波传播损耗的影响[J]. *合肥工业大学学报:自然科学版*, 2010, 23(1): 195-201.
- [6] 潘涛,李艳东. 煤矿巷道中粉尘对电磁波传播特性的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2007, 35(7): 97-99.
- [7] 宋晓霞. 基于MATLAB的通用数据拟合方法[J]. *山西大同大学学报:自然科学版*, 2014, 30(4): 1-3.
- [8] 吴文斌,杨鹏,唐华俊. 两种NDVI时间序列数据拟合方法比较[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 183-188.
- [9] 陈旭,黄文涛,罗林. 天线极化特性的近场测量技术[J]. *电子科技*, 2015, 28(6): 126-126.
- [10] 朱甜甜,李朋朋,王萍,等. 2.6 GHz频段走廊环境下MIMO信道特性的研究[J]. *电子测量技术*, 2016, 39(1): 157-160.
- [11] 马晨,马福昌. 限定空间无限传播损耗模型的研究[J]. *电子测量技术*, 2009, 32(1): 5-7.
- [12] 孙继平,李继生,雷淑英. 煤矿井下无线通信传输信号最佳频率选择[J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2005, 24(3): 378-380.
- [13] 成凌飞. 非理想空巷道中电磁波传播特性的研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2006.

### 作者简介

史亚军(通讯作者),硕士研究生,主要研究方向为矿井无线通信。

E-mail: shiyj1203@qq.com

成凌飞,工学博士,教授,主要从事矿井通信与监控方面的研究与教学工作。

曾文,硕士研究生,主要研究方向为矿井无线通信。