



文章编号:1671-251X(2013)03-0043-03

DOI:

霍羽,房咪咪,刘逢雪,等.煤矿巷道壁粗糙度对电磁波传播的影响[J].工矿自动化,2013,39(3):43-45.

煤矿巷道壁粗糙度对电磁波传播的影响

霍羽, 房咪咪, 刘逢雪, 徐钊

(中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:根据多波模传输理论推导出多波模综合作用下因巷道壁粗糙度引起的电磁波衰减计算公式,并采用多波模模型仿真分析巷道壁粗糙度对电磁波衰减特性的影响。Matlab 仿真结果表明,巷道壁粗糙度对电磁波衰减特性的影响随频率升高而增大,由于波导效应和巷道壁粗糙度的共同作用,煤矿井巷电波传播存在一个 0.4~2 GHz 的低衰减频段。

关键词:煤矿巷道;巷道壁粗糙度;电波传播;多波模模型;低衰减频段

中图分类号:TD655.3

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Influence of wall roughness on electromagnetic wave propagation in coal mine tunnels

HUO Yu, FANG Mi-mi, LIU Feng-xue, XU Zhao

(School of Information and Electrical Engineering, China University of
Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The paper deduced formula of electromagnetic wave attenuation caused by wall roughness under combined effects of multi wave mode according to transmission theory of multi wave mode, and simulated and analyzed effect of wall roughness on attenuation characteristics of electromagnetic wave by multi mode model. Matlab simulation results show that influence of wall roughness on attenuation characteristic increases with frequency. Due to combined effects of waveguide and wall roughness, there is a frequency range with low attenuation of 0.4-2 GHz in wave propagation in coal mine tunnels.

Key words: coal mine tunnel; wall roughness; wave propagation; multi wave mode model; low attenuation frequency range

0 引言

电磁波在巷道中的传播特性受波导效应和巷道壁表面粗糙度等因素的影响,然而目前对于这种影响的讨论,从不同角度研究得出的结论差异很大^[1-4]。参考文献[1]运用波导理论分析基次波模因巷道壁粗糙度产生的散射损耗,得出巷道壁粗糙度造成的散射损耗随频率升高而降低的结论。参考文献[2]运用平面导波模型进行分析和仿真,得出相反

的结论。但总的来看,频率越高,电磁波传播损耗呈下降趋势。然而,上述研究都只是针对一种模式的电磁波进行分析。实际上,电磁波在巷道中的传播特性不仅受巷道壁粗糙度的影响,还受多波模综合作用的影响^[5]。参考文献[3-4]运用几何光学模型,考虑多波模的综合作用,对2种不同频率下电磁波的相对时延进行仿真分析,得出粗糙度对高频信号的衰减大于对低频信号的衰减的结论,但是缺少进一步的理论证明。

收稿日期:2012-12-26。

基金项目:中国矿业大学高水平学术论文专项基金项目(2012LWB75)。

作者简介:霍羽(1983—),女,山西灵石人,博士研究生,主要研究方向为煤矿井下电波传播与天线理论,E-mail:xuzhao551@163.com。

因为电磁波中的散射分量会转化成其他模式继续传播,且频率越高,各波模的掠射角越小,能实现远距离传输的波模越多,所以在分析巷道壁粗糙度对电磁波传播特性的影响时,要考虑高次模的影响^[5]。本文以波导波模理论为基础,推导出多模式下因巷道壁粗糙度引起的电磁波衰减计算公式,并采用多波模模型仿真分析粗糙度对电磁波衰减特性的影响。

1 煤矿井巷波导理论

当电磁波波长比煤矿巷道尺寸小很多时,井巷可被视作有损耗的介质波导^[1]。以巷道中心为原点建立直角坐标系, x 轴沿水平方向, y 轴沿垂直方向, z 轴沿巷道方向。 z 的取值表示电磁波传播距离。在不考虑巷道表面粗糙度的情况下,根据麦克斯韦方程和边界条件,可推导出 (m,n) 模式下电磁波场强随距离 z 的变化因子 $\exp(-ik_{zmn}z)$ ^[1],其中 ik_{zmn} 可称为 (m,n) 波模的传播常数。若电磁波为水平极化,则

$$k_{zmn} \cong \frac{2\pi}{\lambda} - \frac{i\lambda^2}{2} \left[\frac{m^2 K_1}{w^3 \sqrt{K_1 - 1}} + \frac{n^2}{h^3 \sqrt{K_2 - 1}} \right] \quad (1)$$

式中: λ 表示电磁波波长; m,n 分别为波模在水平方向和垂直方向的半波数,是从0开始变化的正整数; w,h 分别为矩形巷道的宽度和高度; K_1 为两侧壁的电参数; K_2 为顶底两面的电参数。

对 $\exp(-ik_{zmn}z)$ 取dB值,可得光滑壁面巷道内水平极化 (m,n) 波模的传播损耗。垂直极化波与水平极化波的场结构对称,此处不再赘述。

2 粗糙巷道壁造成的散射损耗

2.1 单波模作用下的散射损耗

假设巷道壁粗糙度服从均值为0、方差为 σ^2 的高斯分布。 (m,n) 波模入射到两侧壁和上下两壁的掠射角 ϕ_{1nm} 和 ϕ_{2nm} 分别为

$$\phi_{1nm} \cong \arcsin\left(\frac{m\lambda}{2w}\right) \quad (2)$$

$$\phi_{2nm} \cong \arcsin\left(\frac{n\lambda}{2h}\right) \quad (3)$$

若 (m,n) 波模传播距离 z 后,在两侧壁上共反射了 N_{1nm} 次,在顶底壁上共反射了 N_{2nm} 次,则

$$N_{1nm} \cong \frac{z \sin \phi_{1nm}}{w} \quad (4)$$

$$N_{2nm} \cong \frac{z \sin \phi_{2nm}}{h} \quad (5)$$

如果电磁波以掠射角 ϕ 入射到巷道壁,则因巷道壁粗糙度引起的散射损耗系数为^[1]

$$\rho = \exp\left[-2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\sigma \sin \phi\right)^2\right] \quad (6)$$

将式(2)、式(3)分别代入式(6),可得电磁波在粗糙巷道侧壁或顶底壁反射一次所得的散射损耗系数 ρ_{1nm} 、 ρ_{2nm} 为

$$\rho_{1nm} = \exp\left[-2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\sigma \sin \phi_{1nm}\right)^2\right] \quad (7)$$

$$\rho_{2nm} = \exp\left[-2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\sigma \sin \phi_{2nm}\right)^2\right] \quad (8)$$

综合式(2)~(8)可知, (m,n) 波模传播距离 z 后,在侧壁和顶底壁上共经历的散射损耗为

$$\rho_{nm} = \rho_{1nm}^{N_{1nm}} \rho_{2nm}^{N_{2nm}} \approx \exp\left[-\pi^2 \sigma^2 \lambda z \left(\frac{m^3}{w^4} + \frac{n^3}{h^4}\right)\right] \quad (9)$$

将式(9)用dB表示,可得 (m,n) 波模因粗糙巷道壁产生的散射损耗:

$$L_{\text{roughness}}(m,n) = 4.343\pi^2 \sigma^2 \lambda z \left(\frac{m^3}{w^4} + \frac{n^3}{h^4}\right) \quad (10)$$

根据式(10),如果仅考虑给定的单一模式,很容易认为粗糙度对电磁波衰减的影响随频率的升高而减小,损耗值与频率成反比。

2.2 多波模作用下的传播损耗

根据多波模理论,巷道中无线电的传播是多个波模共同作用的结果^[5]。 (m,n) 波模入射到巷道壁的掠射角 ϕ_{1nm} 和 ϕ_{2nm} 的范围均为 $[0, \pi/2]$,由式(2)及式(3)可推导出巷道中可能传输波模的最高阶数为 $m_{\max} \cong 2w/\lambda$, $n_{\max} \cong 2h/\lambda$ 。巷道中所有可能传输的波模总数为

$$M = (2m_{\max} + 1)(2n_{\max} + 1) - 1 \\ = 16wh/\lambda^2 + 4(w+h)/\lambda \quad (11)$$

由式(11)可知,巷道中所有可能传输的波模总数与频率的平方成正比。由式(10)可知,粗糙度散射损耗与模式阶数的三次方成正比;对于固定阶数的波模,粗糙度散射损耗与频率的一次方成反比。因此,在多波模的综合作用下,电磁波散射损耗随频率增长的趋势很可能大于单波模损耗下降的趋势。

假设发射机发射功率恒定,将发射功率归一化并平均分配给各次波模,则经过传输距离 z 后,各波模因粗糙度产生的散射损耗因子为

$$L_{\text{roughness}} = 10 \ln\left(\frac{1}{M} \sum_m \sum_n \rho_{nm}\right) \quad (12)$$

若考虑波导效应和巷道壁粗糙度的共同作用,则总传播损耗为

$$L_{\text{overall}} = 10 \ln \left[\frac{1}{M} \left(\sum_m \sum_n \exp(-ik_{zmn} z) \sqrt{\rho_{mn}} \right)^2 \right] \quad (13)$$

3 仿真分析

运用 Matlab 软件仿真分析巷道壁粗糙度对电磁波传播特性的影响。设矩形巷道高度为 3 m, 宽度为 4 m, 巷道壁的电参数为 10, 传输距离为 100 m, 表面粗糙度标准方差 $\sigma=0.0749$ 。因为粗糙度对水平极化波和垂直极化波的影响一样, 所以本文只仿真水平极化波的情况。

图 1 给出了(0,1)、(3,3)波模及多波模因巷道壁粗糙度引起的散射损耗随频率变化特性。可见, 单波模和多波模共同作用下的电磁波传播特性存在显著差异。在高频处, 巷道壁粗糙度对传播特性的影响不是减小, 而是增大, 与理论推断结果吻合。这一结果可由判断巷道壁粗糙程度的 Rayleigh 判据来佐证。根据 Rayleigh 判据, 当入射波以一定掠射角 φ 掠入射导巷道壁时, 入射波与反射波的相位差 $\Delta\varphi=2k\sigma\sin\phi$, 其中 k 为电磁波在 2π 空间距离内的波长数, $k=2\pi/\lambda$ 。如果 $\Delta\varphi>\pi/2$, 即 $\sigma>\lambda/(8\sin\phi)$, 则巷道表面是粗糙的。由判据可证, 电磁波频率越高, 巷道壁粗糙度的作用越明显。

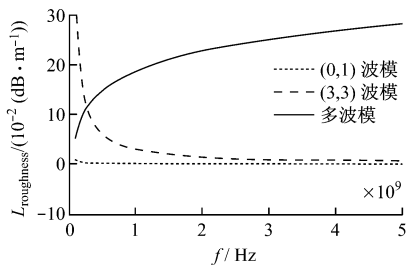


图 1 粗糙壁散射损耗随频率的变化曲线

图 2 给出了多波模综合作用下粗糙巷道壁内电磁波传播损耗随频率的变化曲线。可见, 在不考虑巷道壁粗糙度时, 电磁波传播损耗随频率的增大而减小; 而在考虑巷道壁粗糙度时, 电磁波总体传播特性发生改变, 传播损耗随频率的增大而增大。该结论和参考文献[1-2]中根据单波模分析所得的结果不同, 可见不能利用单波模的特性替代多波模综合作用的特性。由图 2 还可看出, 大约在 0.4~2 GHz 之间存在一个低衰减的频段, 该结论与参考文献[6-8]中根据实测数据得出的分析结果相一致, 证明了理论分析的正确性。

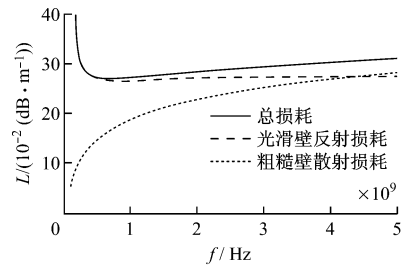


图 2 多波模作用下矩形巷道中电磁波传播损耗随频率的变化曲线

4 结论

根据多波模传输理论, 推导出多波模综合作用下因巷道壁粗糙度引起的电磁波衰减计算公式, 并得出结论: ① 分析巷道电磁波传输特性时, 不能利用单波模的特性替代多波模综合作用的特性。② 由于巷道中多模式电磁波的共同作用, 频率越高, 因巷道壁粗糙度造成的衰减越大, 对电波传播衰减特性的影响也越大。③ 在巷道无线电通信中, 0.4~2 GHz 是较理想的低衰减频段, 该结论对巷道等受限空间通信频率的选择具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MAHMOUD S F, WAIT J R. Geometrical optical approach for electromagnetic wave propagation in rectangular mine tunnels [J]. RADIO SCI-Radio Science, 1974, 9(12):1147-1158.
- [3] ZHANG S, LI B Y. The influence of scattering on multipath channel characteristic of tunnel [C]//6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 2003.
- [4] 张申. 帐篷定律与隧道无线数字通信信道建模[J]. 通信学报, 2002, 23(11):41-50.
- [5] 霍羽, 徐钊, 郑红党. 矩形隧道中的多波模传播特性[J]. 电波科学学报, 2010, 12(6):1225-1230.
- [6] 赵红, 孙继平. 矿井移动通信频率的选择[J]. 煤矿自动化, 1997, 20(4):20-22.
- [7] 曹育红. 矿井无线通信系统的频率选择[J]. 工矿自动化, 2005, 31(4):38-40.
- [8] 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.