

实验研究

文章编号:1671-251X(2012)08-0036-05

崔洁,徐钊,霍羽.煤矿井巷无线信道相干带宽的计算[J].工矿自动化,2012(8):36-40.

## 煤矿井巷无线信道相干带宽的计算

崔洁, 徐钊, 霍羽

(中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**基于矿井巷道电磁波传播多波模理论和射线传播理论,建立了煤矿井巷中无线信号的信道模型。综合考虑传播距离、巷道截面尺寸、载波频率、天线极化、天线位置、介质电参数等影响信道相干带宽的重要参数,推导了煤矿井巷中无线信道相干带宽的公式。在宽为4 m、高为3 m的矩形巷道仿真上述参数对相干带宽的影响,得出了如下结论:煤矿井巷内的相干带宽与频率成正比,与传播距离、巷道截面尺寸和介质电参数成反比,改变天线在巷道截面的位置对相干带宽影响不大。

**关键词:**矿井巷道; 无线通信; 电磁波传播; 信道模型; 相干带宽; 巷道截面; 相对介电常数

**中图分类号:**TD655      **文献标识码:**A      **网络出版时间:**2012-08-03 13:28

**网络出版地址:**<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20120803.1328.009.html>

Calculation of Coherence Bandwidth of Mine Wireless Channel

CUI Jie, XU Zhao, HUO Yu

(School of Information and Electrical Engineering of CUMT., Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Based on the multimode theory and ray theory of electromagnetic wave propagation in coal mine tunnels, the paper established a wireless channel model of wireless signal in mine tunnels, deduced formula of coherence bandwidth of wireless channel considered to important parameters influenced by the coherence bandwidth, such as propagation distance, tunnel section size, carrier frequency, antenna polarization, antenna location, medium electrical parameters. It simulated influence of the above parameters on the coherence bandwidth in a rectangular tunnel with width 4 m, height 3 m, and obtained theoretical results that the coherence bandwidth of the mine channel is proportional to the frequency, inverse proportional to propagation distance, the tunnel section size and the relative medium electrical parameters, to change position of antenna in the rectangular section tunnel is less influenced on coherence bandwidth.

**Key words:**mine tunnel, wireless communication, electromagnetic wave propagation, channel model, coherence bandwidth, tunnel section, relative medium electrical parameter

### 0 引言

多径传播是移动信道的基本特征。在煤矿中,巷道空间狭长,以纵向为主,周围由煤和岩石包裹,

电磁波传播不是四面八方的,而是被局限在巷道内部,因此形成比地面无线通信更为严重的多径衰落。

相干带宽<sup>[1]</sup>是表征多径衰落信道特性的重要参数,它通常被用来描述信道的频率选择性<sup>[2-3]</sup>。当相干

收稿日期:2012-05-25

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(JX111744)

作者简介:崔洁(1987—),女,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为井下移动通信中电磁场与天线研究。Email:348651736@qq.com

带宽小于发送信号带宽时,会引起频率选择性衰落,信号将产生畸变;反之,信道为平坦衰落。因此,研究煤矿井下无线信道的相干带宽,可以改善井巷通信性能。然而,已有的相关研究非常有限。参考文献[4~6]等指出,在巷道中载波频率越低,时延扩展越大。而参考文献[7]得出的结论是时延扩展与频率有关,频率越大时延扩展越大。参考文献[8]进一步验证了参考文献[7]的正确性,但同样只是给出2 GHz处的时延扩展,但具体有多大的相干带宽没有进行深入研究。显然,参考文献[7~8]与参考文献[4~6]有相悖之处。

参考文献[6]讨论了载波频率和极化类型对时延扩展的影响,参考文献[5]运用帐篷定律对井下无线信道的时延扩展进行深入研究,得出煤矿井巷无线信道的相干带宽与通信距离有关,但其详细关系有待进一步研究。

可见,在已发表的论文中,大多是通过研究载波频率、通信距离、极化类型对时延扩展的影响来间接讨论无线信道的相干带宽,且没有考虑巷道截面尺寸、相对介电常数等重要参数对相干带宽的影响,缺乏对相干带宽直接全面的分析。本文在多波模理论和射线传播理论的基础上,建立了煤矿井巷中无线传播的信道模型;考虑了影响信道相干带宽的一些重要参数,推导出了计算煤矿井巷中无线信道相干带宽的公式;通过理论分析、仿真比较,讨论了各个参数对相干带宽的影响。

## 1 煤矿井巷内电波多径传播模型

### 1.1 煤矿井巷环境

煤矿井巷横截面大多数为类矩形或者拱形,在进行理论分析时,为了简便,采用矩形空直巷道进行分析。假设矩形巷道内为空气,外部为均匀介质,两侧壁的介质电参数为 $k_1$ ,顶底壁的介质电参数为 $k_2$ 。利用直角坐标系进行分析,原点位于巷道横截面中心, $x$ 、 $y$ 、 $z$ 分别沿巷道的宽度、高度和长度方向,宽为 $w$ ,高为 $h$ 。

### 1.2 煤矿井巷多波模传播理论

在参考文献[9]中已经建立了矩形隧道多波模模型。本节简要介绍该模型,并据此提出一个无线信号传播模型。

根据多波模理论<sup>[9]</sup>,对于( $m, n$ )波模, $m$ 为波模在巷道水平方向的半波数, $n$ 为波模在垂直方向的

半波数,其取值范围为 $m=0, 1, \dots, \frac{2w}{\lambda}; n=0, 1, \dots, \frac{2h}{\lambda}$ 。

式中: $\lambda$ 为载波波长。

当载波波长比巷道截面尺寸小很多时,每个传播波模可被近似为一条射线。因此,巷道内能够传播信号的各条射线的掠射角应该由传播波模决定。

对于( $m, n$ )次波模,由其定义的每条射线的掠射角为

$$\phi = \arcsin \left( \frac{m\lambda}{2w} \right), \quad \theta = \arcsin \left( \frac{n\lambda}{2h} \right) \quad (1)$$

### 1.3 无线信号传播模型

根据矩形巷道中的射线传播理论<sup>[10]</sup>,本文推导了收发机间各条射线的传播功率与射线掠射角之间的函数关系。推导过程不再赘述。

矩形空直巷道内各射线的幅值为

$$a(\theta, \phi) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{\sqrt{G(\theta, \phi)}}{|z - z_0|} \cos \theta \cos \phi R_1(\phi)^{N_1(\phi)} \times \\ R_2(\theta)^{N_2(\theta)} \rho_1(\phi)^{N_1(\phi)} \rho_2(\theta)^{N_2(\theta)} \times \\ \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{|z - z_0|}{\cos \phi \cos \theta}) \quad (2)$$

式中: $G(\theta, \phi)$ 为波达角信息为( $\theta, \phi$ )时天线增益, $\theta$ 为水平面与 $z$ 轴的夹角, $\phi$ 为俯仰角,取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ , $\theta$ 取负值是因为信号到达方向与坐标方向相反;定义 $\phi$ 为垂直面与 $z$ 轴的夹角, $\phi$ 为方位角,取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ , $\theta$ 和 $\phi$ 即为该路径到达接收点 $D$ 的波达(DOA)信息。

$R_1$ 、 $R_2$ 分别表示射线在侧壁和顶底壁的反射系数,对于垂直极化波: $R_{1Rv} = \left| \frac{\sin |\phi| - (\sin^2 |\phi| + K_1 - 1)^{1/2}}{\sin |\phi| + (\sin^2 |\phi| + K_1 - 1)^{1/2}} \right|^2$ ;  $R_{2Ev} = \left| \frac{K_2 \sin |\theta| - (\sin^2 |\theta| + K_2 - 1)^{1/2}}{K_2 \sin |\theta| + (\sin^2 |\theta| + K_2 - 1)^{1/2}} \right|^2$ 。对于水平极化波: $R_{1Rh} = \left| \frac{K_1 \sin |\phi| - (\sin^2 |\phi| + K_1 - 1)^{1/2}}{K_1 \sin |\phi| + (\sin^2 |\phi| + K_1 - 1)^{1/2}} \right|^2$ ;  $R_{2Eh} = \left| \frac{\sin |\theta| - (\sin^2 |\theta| + K_2 - 1)^{1/2}}{\sin |\theta| + (\sin^2 |\theta| + K_2 - 1)^{1/2}} \right|^2$ 。

根据参考文献[9]可知, $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 分别表示由于巷道侧壁和顶底壁的粗糙度引起的损耗因子,假设隧道壁粗糙度服从均值为0,方差为 $\sigma^2$ 高斯分布,载波波长为 $\lambda$ ,则 $\rho_1 = \exp[-2(\frac{2\pi}{\lambda}\sigma \sin |\phi|)^2]$ ;  $\rho_2 = \exp[-2(\frac{2\pi}{\lambda}\sigma \sin |\theta|)^2]$ 。

$N_1$  为该条路径在侧壁的反射次数;  $N_2$  为该条路径在顶底壁的反射次数。

如果第一次反射发生在前壁:  $N_1 = \frac{|z-z_0| \tan |\phi| + x_0 + x}{w}$  (反射次数为奇数);  $N_1 = \frac{|z-z_0| \tan |\phi| + x_0 - x}{w}$  (反射次数为偶数)。

如果第一次反射发生在后壁:  $N_1 = \frac{|z-z_0| \tan |\phi| - x_0 - x}{w}$  (反射次数为奇数);  $N_1 = \frac{|z-z_0| \tan |\phi| - x_0 + x}{w}$  (反射次数为偶数)。

如果第一次反射发生在顶壁:  $N_2 = \frac{|z-z_0| \tan |\theta| + y_0 + y}{h}$  (反射次数为奇数);  $N_2 = \frac{|z-z_0| \tan |\theta| + y_0 - y}{h}$  (反射次数为偶数)。

如果第一次反射发生在底壁:

$N_2 = \frac{|z-z_0| \tan |\theta| - y_0 - y}{h}$  (反射次数为奇数);  $N_2 = \frac{|z-z_0| \tan |\theta| - y_0 + y}{h}$  (反射次数为偶数)。

其中:  $x_0, y_0, z_0$  为发射天线在矩形巷道截面位置;  $x, y, z$  为接收天线在矩形巷道截面位置。

## 2 煤矿井巷的相关系数矩阵

### 2.1 信道冲激响应模型

假设接收端与发射端之间一共有  $N$  条传播路径,  $i$  为路径标号, 则基带冲激响应模型为

$$h(\tau') = \sqrt{P\sigma_{SF}} \sum_{i=0}^{\infty} \sqrt{P(\theta, \phi)} e^{-j\phi_i} \delta(\tau' - \tau) \quad (3)$$

式中:  $P$  为接收功率;  $\sigma_{SF}$  为对数阴影衰落标准差;  $\phi_i$  为第  $i$  条路径在信道中的随机附加相移(通常由路径长度和载波频率决定), 通常认为服从  $[0, 2\pi]$  内的均匀分布;  $\tau$  表示该条路径的时延,  $\tau = \frac{r}{c} = \frac{|z-z_0|}{c \cos \theta \cos \varphi}$ ,  $r = \frac{|z-z_0|}{\cos \theta \cos \varphi}$ ,  $c$  为光速,  $c = 3.0 \times 10^8$  m/s。

如果只考虑巷道内单侧方向的传播, 达波 DOA 范围均在  $[-\pi/2, \pi/2]$  间, 时延范围为  $[0, +\infty]$ , 则接收到的总功率为  $P = \sum_{\theta, \phi} |a^2(\theta, \phi)|$ 。

对接收总功率归一化:

$$P(\theta, \phi) = \frac{|a^2(\theta, \phi)|}{\sum_{\theta, \phi} |a^2(\theta, \phi)|} \quad (4)$$

### 2.2 相关系数

空时信道的相关系数矩阵为

$$\mathbf{R}(\Delta f) = [\rho_1 \ \rho_2 \ \cdots \ \rho_M] \quad (5)$$

对相关系数矩阵进行傅里叶变化, 得到矢量信道的频率响应模型(信道的传输函数):

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau') \cdot e^{-j2\pi\tau'f} d\tau' = \sqrt{P\sigma_{SF}} \sum_{\theta, \phi} \sqrt{P(\theta, \phi)} e^{-j2\pi f\tau} \quad (6)$$

如果不考虑  $\sigma_{SF}$  的影响, 则信道的频率联合相关系数为

$$\rho(\Delta f) = E \left\{ \frac{H(f) H^*(f + \Delta f)}{(\sqrt{P})^2} \right\} = \sum_{\theta, \phi} p(\theta, \phi) e^{-j2\pi\Delta f\tau} \quad (7)$$

### 3 仿真分析

假设一个宽为 4 m, 高为 3 m 的矩形巷道内, 巷道壁的介质电参数为  $10 - j0.18$ , 载波频率为 900 MHz, 收发天线距离为 100 m, 位于巷道中心。巷道壁表面的粗糙度标准方差  $\sigma = 0.0749$ , 默认垂直极化波。

信道的相干带宽为信道处于强相关状态下频率差的范围。参考文献[1~3]一般在取相关系数为 0.5~0.7 时的频差为地面信道的相干带宽, 由于煤矿井巷为受限空间, 巷道内相关性比较大, 因此, 在这取相关系数为 0.9 时的频差为矩形巷道的相干带宽。

#### 3.1 相干带宽随通信距离的变化规律

图 1 仿真了通信距离与相干带宽的关系曲线。

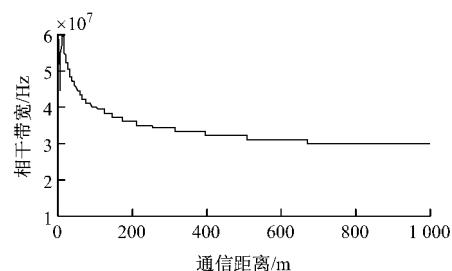


图 1 相干带宽随通信距离变化的曲线

从图 1 可看出, 通信距离越远, 信道相干带宽越小, 当距离增加到 700 m 左右后, 相干带宽恒定。这是因为对给定方向的射线, 随距离增加, 各射线反射次数增加, 时延扩展增大, 故相干带宽减少。另一方面, 根据巷道内的功率距离特性<sup>[11]</sup>, 各射线的传播路径损耗随距离迅速增加后逐渐收敛于稳定值, 最终只剩下极少数接近直射的路径发挥主要作用。

用,这时时延扩展的增加幅度逐渐趋于恒定,相干带宽的变化也随之稳定。这与参考文献[5]“随距离增加,所要考虑的反射次数越多,因而时延扩展反而增加,时延扩展的增加引起相干带宽下降”的结论吻合。

### 3.2 巷道截面尺寸对相干带宽的影响

图2分别仿真了宽固定、高变化和高固定、宽变化2种情况下的巷道截面尺寸对相干带宽的影响。从图2可看出,这2种情况均引起相干带宽的减小,且宽变大时的相干带宽比高变大时的小。这是因为巷道截面尺寸变大,巷道内可传播的波导波模数量增加,各波模近似成的射线的掠射角变小,各射线的反射次数减小。由于存在Brewster<sup>[12]</sup>角,垂直极化波在侧壁的反射系数大于在顶底壁的反射系数,因此,宽变大时,在接收端接收到的射线条数相对高变大时的多,时延扩展变大,相干带宽减小。

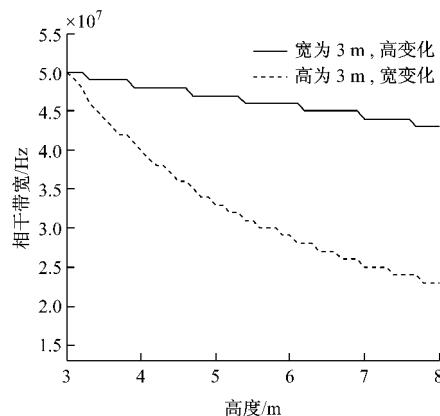


图2 巷道截面尺寸对相干带宽影响的曲线

### 3.3 相干带宽随载波频率变化规律

图3仿真了相干带宽随载波频率变化的曲线。

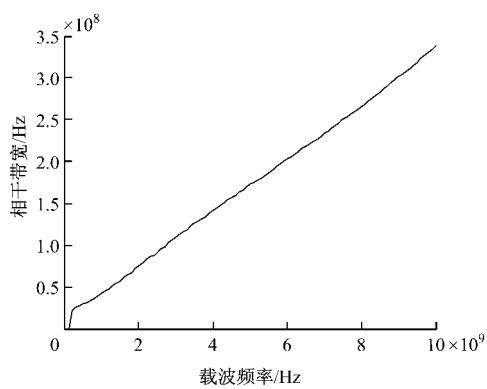


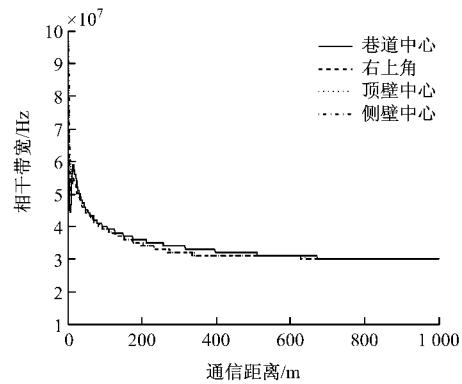
图3 相干带宽随载波频率变化的曲线

由图3可知,随载波频率的增加,信道的相干带宽是增加的。在粗糙度相同的情况下,单波模的散

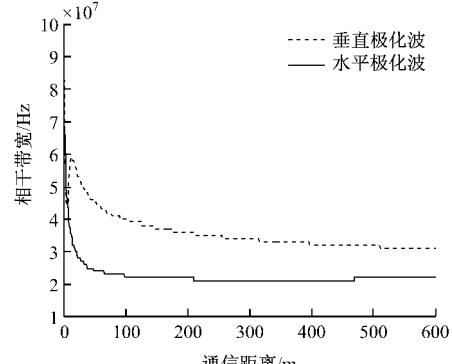
射衰减随频率增加而减小,但是巷道内波模数随频率增加而增加,对总功率归一化后,每个波模上分到的功率减小,波模数随频率增加的速度远大于单波模散射衰减减小的速度<sup>[9]</sup>,因此,在多波模的综合作用下,导致各波模对应射线的散射衰减随频率增加,故到达接收端的射线数减少,相干带宽增大。参考文献[7]曾提出“RMS时延扩展与频率有很大的关系,频率越高,时延扩展越大”。由此可见,这一结论不够准确。

### 3.4 天线位置及极化方向对相干带宽的影响

图4分别仿真了发射天线在巷道截面的位置和极化方向对相干带宽的影响。由图4(a)可看出,天线在巷道截面位置的改变对相干带宽影响不大。这是因为,UHF频段的电磁波具有近光性,当传输距离比巷道的横截面尺寸大很多,天线位置的改变对各波模到达接收端所经历的反射次数与反射路程影响不大,因此,对相干带宽影响并不明显。由图4(b)可看出,水平极化波的相干带宽要比垂直极化波小,原因与前面讨论巷道截面尺寸对相干带宽的影响中Brewster角对反射系数的影响是一致的。验证了参考文献[4~6]结论的正确性。



(a) 天线在巷道不同位置处对应的相干带宽曲线



(b) 水平极化和垂直极化对相干带宽影响的曲线

图4 发射天线在巷道截面的位置和水极化方向对相干带宽的影响曲线  
©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

### 3.5 巷道两侧壁的介质电参数对相干带宽的影响

图 5 仿真了相干带宽随介质电参数变化的曲线。由于介质电参数中电导率很小,因此,可以忽略不计,只考虑它的相对介电常数从 2~70 的变化<sup>[13]</sup>。由图 5 可看出,随着相对介电常数的增大,相干带宽是减小的。这是因为介电常数越大,反射功率越大,到达接收点的射线条数增加,时延扩展变大,相干带宽减小。

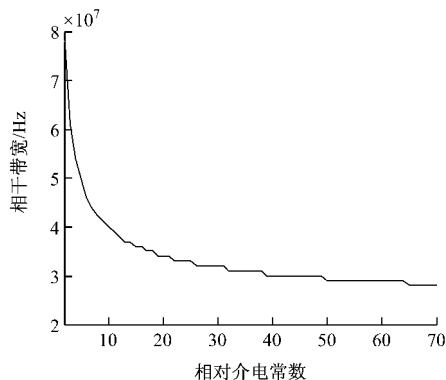


图 5 介质电参数对相干带宽影响的曲线

## 4 结论

在多波模理论和射线传播理论的基础上,建立了煤矿井巷中无线信号传播模型。在此模型基础上对矩形巷道的相干带宽进行仿真分析,得出如下结论:

(1) 随着距离的增加,信道的相干带宽逐渐减小。当传播距离增加到 700 m 左右时,相干带宽趋于稳定,且垂直极化波的相干带宽大于水平极化波。

(2) 通信距离一定的情况下,随着载波频率的增加,相干带宽也是增加的。

(3) 当通信距离和载波频率一定时,巷道截面尺寸越小,信道的相干带宽越大。改变天线在巷道截面的位置对相干带宽影响不大。

(4) 当通信距离、载波频率和巷道截面尺寸一定时,两侧壁的介质电参数越大,无线信道的相干带宽越小。

煤矿井巷是电磁波传播的一个特殊环境,相干带宽是描述信道频率选择性的重要参数,较大的相

干带宽有利于数据的高速传播,因此,计算相干带宽对实际工作有着重要的意义。

## 参考文献:

- [1] XU Zhengwen, WU Jian, WU Zhensen. Second-order Statistics of Radio Wave Propagation through the Structured Ionosphere[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2004, 66(11): 971-980.
- [2] 李彦丽, 张义尉, 段晓辉, 等. 一种利用窄波束成形提高短波信道相干带宽的方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(7): 1531-1535.
- [3] RAPPAPORT T S. Wireless Communications Principles & Practice[M]. Prentice Hall, 1996.
- [4] 张晓光, 朱丽萍, 于浩, 等. 煤矿井巷多径电波接收信号特性分析[J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(2): 178-183.
- [5] 张申. 煤矿井下综合业务数字网网络结构及其无线接入关键技术的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2001.
- [6] 李冰玉, 张申. 隧道内微波多径传播特性的仿真[J]. 微波学报, 2003, 19(4): 37-41.
- [7] ZHANG Y P, HWANG Y. Characterization of UHF Radio Propagation Channels in Tunnel Environments for Microcellular and Personal Communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(1): 283-296.
- [8] 周剑玲, 张旭珍. 2 GHz 无线电波在煤矿井下隧道传播特性[J]. 华北科技学院学报, 2009, 6(3): 39-41.
- [9] 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, 25(6): 1225-1230.
- [10] 李晶. 井下巷道超高频无线电波传播及定位算法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [11] ZHENG Hong-dang, HUO Yu. Research on Characteristics of the Loss of UHF Propagation in Rectangular Tunnels [C]//the 2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008.
- [12] 张韬, 孙为民, 李奇楠. 吸收介质表面 Brewster 定律的数值解[J]. 齐齐哈尔大学学报, 2009, 25(3): 83-85.
- [13] SUN Zhi. Channel Modeling and Analysis for Wireless Networks in Underground Mines and Road Tunnels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(6): 1758-1768.