

矿井巷道综合衰减模型与无线传输误码率性能综合比较

张玉^{1,2}, 杨维^{1,2}

(1. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学(北京)), 北京 100083)

摘要:根据矿井巷道环境中大尺度衰减与小尺度衰减对无线信号传输的影响,提出了矿井巷道综合衰减模型。在矿井巷道环境下,通过将无线信号衰减的理论分析结果与基于模型的测试数据进行比较,验证了该模型的准确性。基于该模型,采用距离度量的方法比较研究了多载波码分多址(MC-CDMA)、正交频分复用(OFDM)等无线传输技术在巷道环境中的误码率性能。仿真结果表明:以MC-CDMA为代表的扩频调制传输技术在近距离通信时的误码率性能较好,而OFDM则在远距离通信中表现出较强的抗衰减特性。

关键词:矿井巷道; 综合衰减模型; 误码率; MC-CDMA; OFDM

中图分类号:TD655.3

文献标志码:A

Integrated attenuation model and BER performance analysis of typical wireless transmission technologies in mine tunnel

ZHANG Yu^{1,2}, YANG Wei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining(China University of Mining and Technology(Beijing)), Beijing 100083, China)

Abstract: According to the wireless transmission characteristics in mine tunnels, a tunnel integrated attenuation model was proposed. The attenuation model is composed of two parts: large-scale fading, including pass-loss and shadowing, and small-scale fading, including multi-path and Doppler shift. The accuracy of the proposed model was supported by the match between analytical results and testing data. Based on the integrated attenuation model, the bit error rate (BER) performance by distance of many transmission technologies including Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Multiple Carrier Code Division Multiple Access (MC-CDMA), MC-DS-SS, DS-SS and MT-SS, were simulated. Simulation results indicate that spread frequency (SF) systems, e. g. MC-CDMA, have better performances in the case of short distances. When the distance is increased, especially before the breakpoint of the model, the BER performances of those SF systems are dramatically declined because of the increased multi-path time delay. By contrast, OFDM system can effectively overcome multi-path fading, leading to a better BER performance in the case of long distance. Therefore, OFDM technique is suitable for the long distance communication in mine tunnels, while SF based techniques are appropriate for short distance environment.

Key words: mine tunnel; integrated attenuation model; bit error rate (BER); Multiple Carrier Code Division Multiple Access (MC-CDMA); Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

针对矿井空直和弯曲巷道的无线通信环境,文献

[1-4]使用基于信噪比度量的方法对典型的无线传

收稿日期:2010-12-05 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50534060);国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2007AA06Z106);煤炭资源与安全开采国家重点实验室(中国矿业大学(北京))开放课题资助项目(2007-06)

作者简介:张玉(1984—),女,河北黄骅人,博士研究生。Tel:010-51466854, E-mail:08111039@bjtu.edu.cn

输技术进行了分析,对矿井巷道环境下的无线通信技术做了研究。由于矿井巷道中无线通信环境的特殊性(如弯曲巷道),使用基于信道比度量的方法不足以有效地评估巷道环境下的无线传输技术性能。因此,本文提出了基于距离度量的方法,用于对无线传输技术进行评估。

基于距离度量的方法研究无线通信技术在矿井环境下的应用,需要综合考虑矿井巷道中大尺度和小尺度衰减对无线通信系统性能的影响。为此,综合考虑了矿井巷道大尺度衰减与小尺度衰减对无线信号传输的影响,提出了矿井巷道综合衰减模型。

在此模型基础上,采用基于距离度量的方法研究了正交频分复用技术(OFDM)、直接序列扩频技术(DS-CDMA)、多载波码分多址技术(MC-CDMA)、多载波直扩码分多址技术(MC-DS-CDMA)以及多音码分多址技术(MT-CDMA)在矿井巷道环境下的误码率性能,并进行了比较,得到的结果为无线技术的井下应用提供了技术依据。

1 矿井巷道综合衰减模型

在矿井巷道环境中,电磁波受到巷道壁与机械设备的影响,传输功率发生大幅度衰减。同时,由障碍物对电磁波造成的反射、散射等影响,使电磁波在巷道内形成了复杂的多径传播。另外,巷道内人员及设备的移动作业行为,导致产生多普勒频移,使巷道内的多径信道具有明显的时变特性^[6]。因此,巷道信道可总结为具有时变特性的复杂多径信道。结合这一结论,将文献[6]提出的路径损耗混合模型与文献[7]提出的几何光学模型相结合,提出了矿井巷道综合衰减模型。该模型综合考虑了巷道的弯曲程度、截面宽高、多径等因素对信号的影响,能够全面地反映矿井巷道复杂的功率衰减特性。

首先从一个基本的信号模型出发,在巷道环境中,一个移动台发出的幅度为 a_0 ,载波频率为 f_0 的频带信号可表示为

$$s_0(t) = a_0 \exp[j(2\pi f_0 t + \varphi_0)] \quad (1)$$

式中, φ_0 为发送符号的初始相位。

无线信道的衰减因子可以表示为

$$\eta = \zeta \xi \quad (2)$$

式中, η 为信道的整体衰减因子; ζ 为大尺度衰减因子; ξ 为小尺度衰减因子。

忽略噪声,巷道环境下的接收信号可表示为直射信号分量及所有可分辨多径分量之和,即

$$r(t) = \sum_{i=0}^N \eta_i s_0(t - \tau_i) =$$

$$\sum_{i=0}^N a_0 \eta_i \exp[j2\pi f_0(t - \bar{\tau}) + j\varphi_0] = \sum_{i=0}^N a_0 \zeta_i \xi_i \exp[j2\pi f_0(t - \bar{\tau}) + j\varphi_0] \quad (3)$$

式中, $i=0$ 对应直射路径,可分辨多径的数目为 N ; η_i 和 τ_i 分别为第 i 条可分辨多径信号的综合衰减因子及时延; $\bar{\tau}$ 为 N 条多径的平均时延, $\bar{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i$ 。

从接收信号表达式(3)中可以看出,要确定接收信号的强度,首先要分别计算出巷道信道的小尺度衰减因子和大尺度衰减因子。在矿井巷道综合衰减模型中,提出以文献[6]的路径损耗和阴影衰落混合衰减模型作为大尺度衰落部分的基本模型,结合矿井巷道中信号的衰减特性做出相应的调整,采用文献[7]的几何光学模型,代替原模型中的路径损耗部分;阴影衰减则采用相似环境的实测数据来进行模拟^[8-9]。根据测试结果^[10-13],小尺度衰减则使用 Nakagami- m 分布($m=1$)。

下面对矿井巷道综合衰减模型的各部分进行具体的分析。

1.1 大尺度衰减模型

文献[6]中介绍了路径损耗和阴影衰落的混合衰减模型,其接收功率 P_r 和发射功率 P_t 之比为

$$\frac{P_r}{P_t}(\text{dB}) = 10\gamma \lg \frac{d}{d_0} - 10\lg K + \psi_{\text{dB}} \quad (4)$$

式中, γ 为路径损耗指数; d_0 为传播距离和天线远场的参考距离; K 为一个依赖于天线和平均信道损耗的常数; ψ_{dB} 为均值为0、方差为 φ_{dB} 的高斯随机变量。

式(4)给出的大尺度衰减模型主要由路径损耗和阴影衰减两部分组成,前面两项描述了自由空间的路径损耗,最后一项 ψ_{dB} 代表发射机和接收机之间的障碍物通过吸收、反射、散射和绕射等方式造成的阴影衰减的影响。为了反映巷道环境大尺度衰减的特点,将原模型中路径损耗的部分,采用文献[7]提出的几何光学模型来模拟。为了简化问题,在本文的研究范围内,假设大尺度衰减与多径无关,即各条多径的大尺度衰减因子 ζ_i 取值相同,即 $\zeta_i = \zeta$ 。

下面从路径损耗和阴影衰减两部分分别来讨论计算的具体方法。

1.1.1 路径损耗估计模型

对受限空间的传播损耗进行建模的信道模型可以归为4类,即统计传播模型、经验直射模型、经验多径模型以及光学模型。其中,由文献[7]提出的实用性几何光学(RO)模型,在准确度与计算复杂度方面具有一定的优势^[14]。

根据实用性几何光学模型,随着收发天线间的距离增大,信号的衰减曲线可以分为两个区域。在收发天线间距离较小的范围里,接收信号功率随距离增大衰减较快,称为近传播区域。该区域内可保证第一菲涅尔区内无明显障碍,信号功率衰减近似服从自由空间衰减,因此,在该区域采用单径自由空间衰减模型来计算路径损耗,该模型下的衰减可以表示为

$$L_n(\text{dB}) = 10\lg \frac{P_t}{P_r} = -10\lg \frac{G_d \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (5)$$

式中, G_d 为视距方向上发射天线和接收天线的天线增益。

而在较远的范围里,接收信号功率随距离增大衰减较慢,该范围称为远传播区域。在这个区域的信号传播类似于在波导中的传播,因此,在这个区域的路径损耗采用分析性 RO 公式来计算,其衰减可以表示为

$$L_t(\text{dB}) = 5\lambda d \left(\frac{1}{w^2} \lg \frac{1}{|R_1|^2} + \frac{1}{h^2} \lg \frac{1}{|R_2|^2} \right) + L_t + L_r \quad (6)$$

式中, w 与 h 分别为巷道的宽度与高度; R_1 和 R_2 为掠射角分别为 $\varphi_1 = \frac{\lambda}{2w}$ 和 $\varphi_2 = \frac{\lambda}{2h}$ 时巷道中竖直和水平平面的反射系数; L_t 和 L_r 为发射天线和接收天线的耦合损耗。

在巷道交叉区域中点 (x, y) 的耦合损耗可以采用式(7)来近似计算

$$L(\text{dB}) = 10\lg \left[\frac{2\pi w h}{\lambda^2 G} \cos^{-2} \left(\frac{\pi x}{w} \right) \cos^{-2} \left(\frac{\pi y}{h} \right) \right] \quad (7)$$

近传播区域和远传播区域的分界点,称为断点(Break Point) [10],该分界点可通过式(8)求出。

$$L_n(\text{dB}) = L_t(\text{dB}) \quad (8)$$

图1分别给出了在空直巷道内,载频分别为1.8 GHz与2.4 GHz时,以传输距离为度量的自由空间衰减模型和分析性几何光学(分析性 RO)模型的曲线。环境参数设置为巷道宽4.0 m,高3.5 m,经计算耦合损耗 L 约为30.5 dB,巷道四壁的介电常数为 $\varepsilon_r = 10$, 导电率为 $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$ [8]。由图1可见,1.8 GHz载频下的断点位置约在40 m处,2.4 GHz载频下的断点位置约在50 m处。以断点位置所示距离为界点,将分别采用单径自由空间衰减模型与分析性 RO 模型对巷道内的路径损耗进行表征。

1.1.2 阴影衰减估计模型

大尺度衰减的第2部分为阴影衰减,其产生的主要原因为接收机位于信号传播路径中障碍物的阴影区,表现为信号功率的随机性衰减。阴影衰减的大小

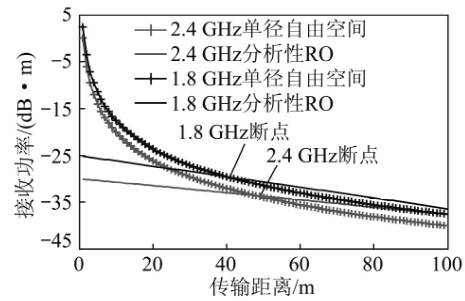


图1 基于几何光学的路径损耗模型分析

Fig. 1 Pass-loss model analysis based on RO

主要与障碍物的大小、位置和表面粗糙程度有关。经过大量数据证实,对数阴影模型,可以较精确的模拟室内外传播环境中信号接收功率的变化。该模型中,阴影衰减分量 ψ_{dB} 为均值为0、方差为 φ_{dB} 的高斯随机变量 [11]。根据文献 [13] 中的实测数据,在空直巷道(LOS环境)中, φ_{dB} 的近似取值为2.6 dB;在弯曲巷道中(NLOS环境), φ_{dB} 的近似取值为2.1 dB。

1.1.3 大尺度衰减模型

综合路径损耗模型与阴影衰落分析结果,得到矿井巷道综合衰减模型的大尺度衰减模型,如式(9)所示。通过式(9)可以进行矿井巷道信道大尺度衰减的近似计算,将计算出的大尺度衰减 dB 值转化为线性标度,即可得到矿井巷道信道的大尺度衰减因子 ζ 。

$$L(\text{dB}) = L_{\text{pass-loss}} + L_{\text{shadow}} = \begin{cases} -10\lg \left[\frac{G_d \lambda^2}{(4\pi d)^2} \right] + \psi_{dB} & (\text{断点之内}) \\ 5\lambda d \left(\frac{1}{w^2} \lg \frac{1}{|R_1|^2} + \frac{1}{h^2} \lg \frac{1}{|R_2|^2} \right) + L_t + L_r + \psi_{dB} & (\text{断点之外}) \end{cases} \quad (9)$$

1.2 小尺度衰减模型

根据文献 [6] 可知,多径环境中的信号幅度衰减主要服从瑞利分布、莱斯分布与 Nakagami - m 分布。其中,瑞利分布主要用来描述接收端的多径信号中没有直射分量的情况;莱斯分布主要用于直射分量比重较大的多径环境;Nakagami - m 分布则主要用来描述长距离高频信道的具有时变性的多径衰减情况。通过调整参数 m , Nakagami - m 分布可以模拟一系列变化的衰减环境,其中包括瑞利分布与莱斯分布。由文献 [12-13] 可知,采用 Nakagami - m 分布对巷道环境的小尺度衰减进行建模,所得仿真数据与大量的实测数据相吻合 [12-13],能够准确地反映矿井巷道信道的时变多径特性。

因此,矿井巷道综合衰减模型中使用 Nakagami -

m 衰减模型来建模小尺度衰减因子 ξ 。 ξ 的概率密度可以表示为

$$f(\xi) = \frac{2}{\Gamma(1)} \left(\frac{1}{\Omega} \right) \xi e^{-\xi^2/\Omega} \quad (10)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; Ω 为 ξ 的方差, 即 $\Omega = E(\xi^2)$ 。测试表明^[10-13], 在 Nakagami - m 衰减模型下, 空直巷道的参数 m 值可取为 3, 弯曲巷道的参数 m 值可取为 1。

1.3 综合衰减模型曲线

根据对大尺度衰减因子 ζ 与小尺度衰减因子 ξ 的分析结果, 可以得到综合衰减因子 η , 从而建立矿井巷道综合衰减模型。为了对该模型进行验证, 以空直巷道环境为例, 设巷道宽度为 4.0 m, 高度为 3.5 m, 巷道四壁的介电常数为 $\varepsilon_r = 10$, 导电率为 $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$ ^[3], φ_{dB} 取值为 2.6 dB^[3], 分别给出了载频为 2.4 GHz 和 1.8 GHz 的接收信号功率随距离变化的衰减曲线, 如图 2 所示。

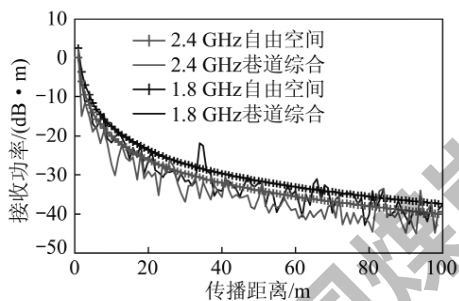


图2 以距离为度量的巷道综合衰减模型仿真

Fig. 2 Receiving signal strength in dB·m as function of distance under the comprehensive attenuation model

在图 2 中, 巷道综合衰减模型下的无线信号强度随传播距离的增加波动下降, 整体的下降趋势较好地模拟了矿井巷道信道的大尺度路径损耗特性, 而衰减中的短距离波动则体现了小尺度衰减及阴影衰减的随机性对信号传输的影响。文献 [1, 15] 中给出的实测数据, 可以发现采用该综合衰减模型得出的结果比自由空间衰减模型等更加接近实际情况。

2 几种传输技术的误码率性能比较

文献 [1-4] 已经对 OFDM 传输技术以及几种典型的 CDMA 技术在矿井巷道内, 以信噪比为度量的误码率性能进行了分析。为了更全面地了解各通信系统在巷道中的误码率性能, 使用基于距离度量的方法, 对 OFDM、MC - CDMA、DS - CDMA、MC - DS - CDMA、MT - CDMA 等通信技术进行了仿真, 所采用的模型为本文所提出的巷道综合衰减模型。

在仿真中, 几种通信技术的传输速率统一限定为

10 Mb/s, 采用 QPSK 调制方式进行符号映射, 信噪比设为 20 dB, 采用定向天线, 主瓣天线增益为 $G_d = 20 \text{ dBi}$ 。移动台运动速率设为 10 km/h, 载波频率分别为 2.4 GHz 与 1.8 GHz。依据相关文献的测量结果^[4, 16-17], 设 2.4 GHz 载频信号在空直巷道与弯曲巷道的时延均方根分别为 85 ns 与 35 ns, 1.8 GHz 载频信号在空直巷道与弯曲巷道的时延均方根分别为 35 ns 与 10 ns。

另外, 各系统的具体参数根据矿井巷道的无线传输特性进行了相应的设计。OFDM 系统将保护间隔设为 4 倍的多径时延均方根, 信号周期设为 5 倍的保护间隔长度, 从而有效避免多径时延扩展引起的码间干扰。MC - CDMA 系统结合了扩频与多载波方式, 设子载波数和扩频增益均为 32。DS - CDMA 系统与 MT - CDMA 系统均采用 RAKE 接收机进行分集接收。在空直巷道中, DS - CDMA 系统在 2.4 GHz 和 1.8 GHz 载频时在接收端可以分别分离出 4 条多径和 2 条多径, MT - CDMA 系统分别可以分离出 5 条多径和 3 条多径; 在弯曲巷道中, DS - CDMA 系统可以分别分离出 2 条多径和 1 条多径, 而 MT - CDMA 系统设计为可以分别分离出 3 条多径和 1 条多径信号。MC - DS - CDMA 系统取子载波数与扩频增益均为 32, 信号周期为 3 200 ns, 远大于矿井无线信道的最大延迟时间, 且在两种频率 (2.4 GHz 和 1.8 GHz 载频) 及两种巷道环境下只能分离出一条多径信号, 从而保证了子载波经历的是平坦衰减。

图 3 给出了在相同传输速率下, 载波频率分别为 2.4 GHz 与 1.8 GHz 时, 上述各种传输技术在空直巷道和弯曲巷道中, 以距离为度量的误码率性能的仿真结果。

从图 3 可以看出, 当通信速率为 10 Mb/s 时, 均方根时延较小的 1.8 GHz 载频系统的误码率性能略优于 2.4 GHz 载频的误码率性能。当传输距离较近时 (约 30 m 以内), 矿井 CDMA 系列系统表现出了较好的误码率性能。尤其是 MC - CDMA 系统, 在 25 m 处空直巷道中误码率可达到 10^{-4} 数量级, 弯曲巷道中也能达到 10^{-3} 。这主要得益于 MC - CDMA 系统将基带信号复制后扩频调制到多个子载波的调制方式, 这样各子载波传输的是同一基带信号, 通过在接收端将各子载波信号有效合并, 能够得到较高的误码率性能。其次为 MC - DS - CDMA 系统, 由于同时使用扩频与多载波调制方式, 能够从克服扩展时延和降低多径干扰功率两个方面来有效抵抗多径干扰。由于 DS - CDMA 系统与 MT - CDMA 系统当载频为 1.8

GHz 时的弯曲巷道环境下都只能分辨出一条多径信号,载波经历平坦衰减,因此二者在 1.8 GHz 载频下弯曲巷道中也具有较好的误码率性能。但是由于二者

在其它条件下都具有多条可分辨多径,虽然使用了 Rake 接收机进行分集接收,但由于多普勒频移破坏了多径信号的正交性,使得系统的误码率性能仍然较差。

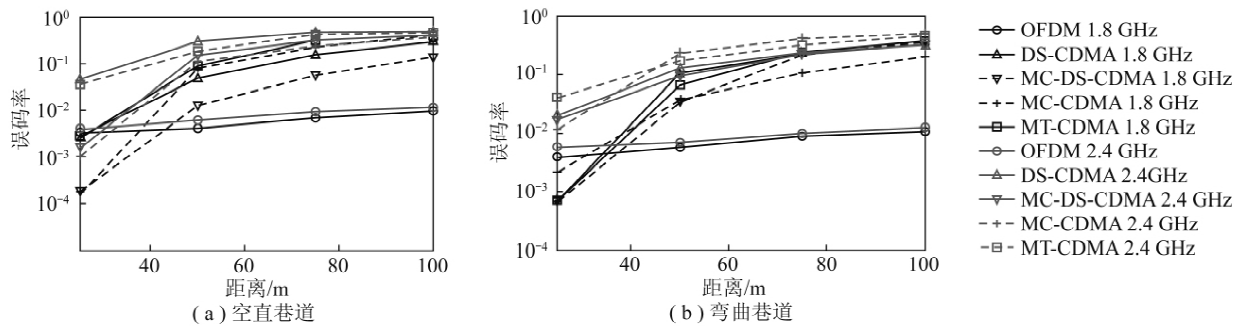


图3 10 Mb/s 传输速率下各通信系统的误码率性能

Fig. 3 BER performance of several systems with a bit rate of 10 Mb/s

随着传输距离的增加,CDMA 系列通信系统的误码率性能严重下降。这主要是因为随着传输距离的增加,各径信号由于受到大尺度衰减的影响,合成信号衰减更加严重,使得信噪比显著下降。另外,多普勒频移破坏了多径信号的正交性使得可分辨多径信号码间干扰增加^[4]。尤其是 MT-CDMA 系统,其子载波间频域的重叠部分较大,造成其正交性很容易遭到破坏。这些都导致随着传输距离的增加,CDMA 系列通信系统的误码率性能严重下降。

相比较,OFDM 系统的误码率性能随着距离的增加衰减相对平缓,经过从 25 m 到 100 m 的这一段传播距离,误码率仅从 $10^{-2.5}$ 增加到 10^{-2} 。这主要是由于 OFDM 技术通过插入保护间隔和使用循环前缀,能够彻底消除码间干扰,克服多径效应的影响,因此在长距离通信中仍然能够保持较好的误码率性能。OFDM 系统的子载波间的正交性同样会受到多普勒频移的影响,然而从图 3 可见,当移动台的移动速率为 10 km/h 时,多普勒效应对误码率性能的影响力要低于多径效应对误码率性能的影响。

3 结 论

(1) 在近距离传输范围内,信号强度较大,CDMA 系列系统抵抗窄带干扰的能力得到发挥,因此获得了较好的误码率性能。

(2) 随着传输距离的增加,在大尺度衰减的影响下,信号强度大幅度衰减,多径效应与多普勒频移对系统误码率性能的影响凸显,造成 CDMA 系列的误码率性能迅速下降。而插入保护间隔的 OFDM 系统能够消除多径效应引起的码间干扰的影响,虽然受到多普勒频移的作用,但在远距离通信时,仍具有较好的抗衰减特性。

参考文献:

- [1] 杨 维,周青青. 典型频域扩频多载波 CDMA 调制在矿井巷道信道下的性能分析 [J]. 煤炭学报,2010,35(5):865-870.
Yang Wei,Zhou Qingqing. Performance analysis of typical frequency domain spreading multicarrier CDMA modulation in mine tunnel [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(5):865-870.
- [2] 杨 维,牛 丽,齐 辉. DS-CDMA 调制技术在矿井巷道中的通信性能分析 [J]. 煤炭科学技术,2008,36(3):88-91,57.
Yang Wei,Niu Li,Qi Hui. Analysis on communication performances of DS-CDMA modulation technology in mine roadway [J]. Coal Science and Technology,2008,36(3):88-91,57.
- [3] 杨 维,牛 丽. 多音 CDMA 调制在矿井巷道中通信性能分析 [J]. 中国矿业大学学报,2009,38(1):56-60,66.
Yang Wei,Niu Li. Performance analysis of MT-CDMA modulation in the mine tunnel [J]. Journal of China University of Mining & Technology,2009,38(1):56-60,66.
- [4] 杨 维,牛 丽. MC-DS-CDMA 调制通信的矿井巷道信道仿真分析 [J]. 系统仿真学报,2009,21(14):4524-4527.
Yang Wei,Niu Li. Simulation analysis of MC-DS-CDMA modulation in mine tunnel [J]. Journal of System Simulation,2009,21(14):4524-4527.
- [5] 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.
Zhang Shen. Tent law and modeling of radio digital communication channel in tunnel [J]. Journal of China Institute of Communications,2002,23(11):41-50.
- [6] Andrea Goldsmith. 无线通信 [M]. 杨鸿文,李卫东,郭文斌,等译. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [7] Zhang Y P. Novel model for propagation loss prediction in tunnels [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology,2003,52(5):1308-1314.
- [8] Han Guorui,Zhang Wenmei,Zhang Y P. An experiment study of the propagation of radio waves in a scaled model of long-wall coal mining tunnels [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2009,8:502-504.
- [9] Dudley D G,Liénard M,Mahmoud S F,et al. Wireless propagation in

- tunnels [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49 (2): 11–26.
- [10] Boutin M, Benzakour A, Despins C L, et al. Radio wave characterization and modeling in underground mine tunnels [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2008, 56(2): 540–549.
- [11] Laselva D, Zhao Xiongwen, Meinila, et al. Empirical models and parameters for rural and indoor wideband radio channels at 2.45 and 5.25 GHz [J]. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005, 1: 654–658.
- [12] Young W F, Holloway C L, Koepke G, et al. Radio-wave propagation into large building structures—Part 1: CW signal attenuation and variability [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2010, 58(4): 1 279–1 289.
- [13] AbouRaddy A F, Elnoubi S M. Statistical modeling of the indoor radio channel at 10 GHz through propagation measurements [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2000, 49(5): 1 491–1 507.
- [14] Zhang Y P, Hong H J. Ray-optical modelling of simulcast radio propagation channels in tunnels [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2004, 53: 1 800–1 808.
- [15] Chahe Nerguizian, Charles L. despins, Mourad Djadel. Radio-channel characterization of an underground mine at 2.4 GHz [J]. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2005, 4(5): 2 441–2 453.
- [16] 杨 维, 李 滢, 孙继平. 类矩形矿井巷道中 UHF 宽带电磁波统计信道建模 [J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 467–472.
- Yang Wei, Li Ying, Sun Jiping. A statistical channel model of wide-band UHF radio waves along rectangular-like mine tunnel [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 467–472.
- [17] Zhi Sun, Ian F. Akyildiz. Channel modeling and analysis for wireless networks in underground mines and road tunnels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(6): 1 758–1 768.

重要启事

目前,科技期刊中基金项目著录存在很多问题,出现了编造、剽窃基金项目等学术不端行为。同时,由于科技论文中可列出的基金项目数量没有相关规定,有些作者为了项目结题,在论文中尽可能多地标注与论文无关的基金项目,这是一种极其不负责任的行为。为了弘扬健康、向上的学术风气,还科技期刊一片净土,《煤炭学报》编辑部针对本刊论文中的基金项目著录进行如下规定:

1. 禁止编造、剽窃基金项目。
2. 禁止出现与论文研究内容不相关的基金项目。
3. 我刊不排斥、不歧视无基金项目资助的论文,所有稿件一视同仁。
4. 原则上每篇论文只允许标注 1~2 个与本文研究内容直接相关的基金项目,最多不超过 3 个。
5. 对于获得多个基金项目资助的论文,只标注省部级及以上级别的基金项目。
6. 论文中出现的所有基金项目,请作者务必提供带编号的基金批文复印件或扫描件。

对于基金项目著录过程中出现学术道德问题甚至违反相关法律法规的,视情节轻重,我刊保留将作者列入黑名单并公开发表声明、通报作者所在单位和通报相关基金委员会的权利。本规定从 2011 年 2 月份,即 2011 年《煤炭学报》第 2 期开始执行,敬请广大读者、作者监督。

本刊编辑部

2011 年 1 月