

Research on the Radio Wave Propagation at 2.0 GHz in Coal Mine Tunnels

ZHOU Jianling^{*}, YU Zhen, RAN Xiaoying

(North China Institute of Science and Technology, Yanjiao Hebei 065201, China)

Abstract : The mobile telecommunication system working at the microwave band will come to the multipath effect and Doppler phenomenon in the coal mine tunnels. Based on the analysis about the characteristic of the wireless channel in the coal mine tunnels, it can be equivalented to the exponential fading channel. In this paper, the delay tap line model is used to study the propagation of the radio waves in coal mine tunnel at 2.0 GHz. The result indicates that: the RMS delay expansion of the microwave band radio waves propagation is 70 ns in the coal mine tunnel, which is consistent with the actual measurements.

Key words : tunnel; confined space; delay tap line; delay spread

EEACC:6150D;5210C

2 GHz 无线电波在煤矿井下隧道传播的研究

周剑玲^{*}, 于臻, 冉小英

(华北科技学院电子信息工程系, 河北 燕郊 065201)

摘 要 : 由于矿井隧道的特点, 采用微波频段的井下移动通信系统在工作时会出现明显多径效应和多普勒频移效应。通过对煤矿井下无线信道特性的理论分析, 可将信道等效为指数衰落信道。本文采用均匀间隔的延时抽头线模型对矿井隧道进行了建模, 对 2 GHz 的无线电波在煤矿井下隧道传播的情况进行了研究。研究表明: 对于微波无线电信号, 在煤矿井下隧道传播时均方根时延扩展是 70 ns, 这与实际测量值相符合。

关键词 : 隧道; 限定空间; 延时抽头线; 时延扩展

中图分类号: TN929.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2009)06-0910-03

微波段频率在限定空间无线通信中的应用受到了关注^[1~4, 8]。微波段频率在隧道中传播会发生多次折射和反射, 即产生多径传播现象。多径传播会使接收信号出现频率选择性衰落和时延扩展, 引起码间干扰。此外, 当隧道中有车辆运动时会产生多普勒效应, 也会影响信号的传播。文献[1~3]对隧道环境无线传输的特性进行了测试, 给出了无线电波在限定空间中传播时的均方根时延扩展可能达到的数值, 但是未分析其原因。文献[4]分析了发射天线极化方向和散射对时延扩展的影响, 但是没有考虑多普勒频移的影响。文献[9]研究了多普勒效应对无线网络性能的影响, 但是未能将其应用于限定空间。因此微波段频率应用于煤矿井下隧道通信需要进一步研究, 我们研究了 2 GHz 的无线电波在煤矿井下隧道传播的情况。

1 煤矿井下无线信道的描述

在煤矿井下, 考虑基站和矿井机车移动台组成的移动通信系统。在基站和移动台之间的信号传输是多径的。

假设送入信道的信号为: $x(t) = \text{Re}(x_1(t) e^{j2\pi f_c t})$, 则信道输出信号 $y(t) = \sum_{n=1}^L a_n(t) x[t - \tau_n(t)]$, $x_1(t)$ 是等效低通信号, f_c 是载波频率, $a_n(t)$ 是第 n 条路径的衰减, $\tau_n(t)$ 是第 n 条径的时延, L 是路径数。接收到的等效低通信号为

$$r_1(t) = \sum_{n=1}^L a_n(t) e^{-j2\pi f_c \tau_n(t)} x_1(t - \tau_n(t)) \quad (1)$$

依据井下实际情况, 可将煤矿井下信道视为密集型离散多径(室内信道模型)^[5], 即 n 的数量足够大, 根

据中心极限定理, $r_1(t)$ 是复高斯随机过程。
那么井下等效低通信道模型, 可以用时变脉冲响应描述:

$$c(\tau, t) = \sum_{n=1}^L a_n(t) \delta(t - \tau - \tau_n(t)) \tag{2}$$

同样, $c(\tau, t)$ 也是复高斯随机过程。其中 τ 表示时延轴, t 表示时间轴。如果 $c(\tau, t)$ 为零均值复高斯随机过程, 则其包络 $R = |c(\tau, t)|$ 服从瑞利分布。

$$f_{\text{Rayleigh}}(r) = \frac{r}{2} \exp\left[-\frac{r^2}{2}\right] \quad (r \geq 0) \tag{3}$$

如果均值非零, 则其包络 $R = |c(\tau, t)|$ 服从莱斯分布。

$$f_{\text{Rice}}(r) = \frac{r}{2} \exp\left[-(r^2 + \tau^2)/2\right] I_0\left[\frac{r\tau}{2}\right] \quad r \geq 0 \tag{4}$$

$I_0(z)$ 是修正的 Bessel 函数, 定义为 $I_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(z \cos(u)) du$ 。

假设 $c(\tau, t)$ 是宽平稳的, 而且各条径的时延和相位都满足不相关散射的条件, 则 $c(\tau, t)$ 的自相关函数为

$$R_c(\tau_1, \tau_2, t) = \frac{1}{2} E[c^*(\tau_1, t) c(\tau_2, t + \tau)] = R_c(\tau, t), \quad \tau = \tau_1 - \tau_2 \tag{5}$$

如果 $t = 0$, 则 $R_c(\tau, t) = R_c(\tau)$ 是信道的时延功率谱。可求得它的均方根时延扩展:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{E[\tau^2] - E^2[\tau]} \tag{6}$$

2 煤矿井下无线信道模型

矿井隧道比较狭窄, 且分布于不同的水平面, 截面尺寸通常在几十平米内, 巷道壁四周均为岩石和煤层, 粗糙不平, 隧道中还分布着大量粉尘、采煤支架、机电设备、钢轨、动力线等, 无线电波在这样环境中传播会导致到达接收信号产生严重衰落, 可将信道等效为指数衰落信道^[6], 结合 IEEE802.11 WLAN 规定推荐的一个指数衰落模型^[7], 该模型的多径强度谱为

$$p(\tau) = R_c(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{d} \exp(-\tau/d) & 0 < \tau < 400ns \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{7}$$

公式中的 d 为均方根时延扩展。

若 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别代表信道输入和输出的复数低通样值时, 则有

$$x(t - \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t - nT) \frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \tag{8}$$

其中 B 为等效基带信号的带宽, 采样间隔 $T = 1/2B =$

$1/W_0$ 。将 $x(t - \tau)$ 的表达式代入式 $y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau, t) x(t - \tau) d\tau$, 整理得到

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(t - nT) g_n(t) \tag{9}$$

其中

$$g_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau, t) \left[\frac{\sin(2\pi B(\tau - nT))}{2\pi B(\tau - nT)} \right] d\tau \tag{10}$$

假定信道冲激响应的长度为 NT , 则当 $n > 0$ 或者 $n > N$ 时, $g_n(t)$ 的值近似为 0, 则输入输出关系可以近似表示为

$$y(t) = \sum_{n=0}^N x(t - nT) g_n(t) \tag{11}$$

$$g_n(t) = T \cdot c(\tau, t) \tag{12}$$

$$y(t) = \sum_{n=0}^N x(t - nT) g_n(t) = T \sum_{n=0}^N x(t - nT) c(nT, t) \tag{13}$$

采用均匀间隔的延时抽头线模型^[5] (图 1) 对煤矿井下无线信道进行研究。

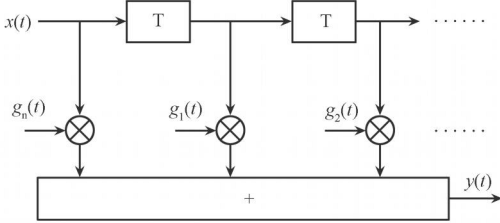


图 1 抽头延时线模型

由于井下隧道环境的特殊性, 电磁波在这样的环境中传播主要是多径传播, 为了说明问题在这里重点研究 Rayleigh 衰落信道, 即 $g_n(t)$ 为零均值复高斯随机变量。假设信道特性满足宽平稳不相关散射(WSSUS)特性, 每个抽头系数的功率谱密度都由多普勒频谱决定, 则第 n 个抽头增益的方差 σ_n^2 为 $E[|g_n(t)|^2] = T^2 E[|c(nT, T)|^2] = T^2 p(nT)$ (14)

以上方差可从多径强度曲线的采样值得到。

$$g_n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k(t) \text{sinc}\left[\frac{k}{T} - n\right] \tag{15}$$

均匀间隔的抽头延时模型抽头系数的产生如图 2 所示。图中 $w_n(t)$, ($n = 1, 2, \dots, N$) 时均值为零, 方差为 1 的复白高斯过程。 $H(f)$ 为多普勒滤波器, $H(f) = \sqrt{S_d(f)}$, $S_d(f)$ 时多普勒功率谱。由于矿井机车的移动速度为 30 km/h, 选择载波频率为 2 GHz, 产生的最大多普勒频移为 $f_d = f_c \frac{v}{c} = 76.9 \text{ Hz}$, $c = 3 \times 10^8$

m/s。采用 Jakes 功率谱, $S_d(f) = \frac{1}{\sqrt{1 - (f/f_d)^2}}$,

$H(f) = \frac{1}{[1 - (f/f_d)^2]^{1/4}}$ 。根据以上分析, 频带宽

度为 20 MHz,取采样间隔为 50 ns,9 个抽头,可计算出井下 3 条路径和 8 条路径的参数如表 1 和表 2。

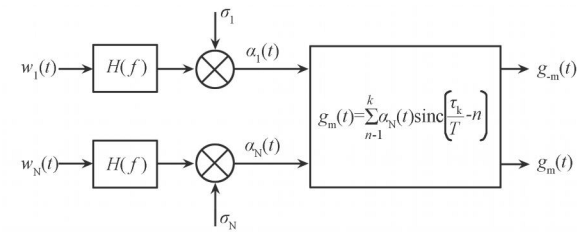


图 2 均匀间隔的延时模型抽头系数的产生

表 1

径编号	多径时延/ ns	功率	多普勒谱
1	0.0	1.0	U 型谱
2	50.0	0.1148	U 型谱
3	100.0	0.01288	U 型谱

计算得到这种情况下的均方根时延 $rms = 18\text{ ns}$ 。

表 2

径编号	多径时延/ ns	功率	多普勒谱
1	0	1.0	经典 U 型谱
2	50	0.51286	经典 U 型谱
3	100	0.2630	经典 U 型谱
4	150	0.1349	经典 U 型谱
5	200	0.06918	经典 U 型谱
6	250	0.03548	经典 U 型谱
7	300	0.01820	经典 U 型谱
8	350	0.00933	经典 U 型谱

此时的均方根时延 $rms = 70\text{ ns}$ 。

以上计算结果均方根时延扩展与文献[1]有一定差别,这是因为 2 GHz 高于文献[1]中所使用的测试频率;而这一结果是介于实际测量值文献[2]中

86.1 ns 与文献[3]中的 60.6 ns 之间,是合理的。

3 结论

煤矿井下隧道是一个非常特殊的环境。为得 2 GHz 到频率在这一特定环境下的传播特性,我们采用了均匀间隔的抽头延时模型进行分析。分析结果表明,煤矿井下隧道传播时延扩展应小于 70 ns,这符合实际的测量结果^[1-3]。

参考文献:

[1] 张跃平等. 宽带 UHF 无线电波在隧道中的传播信道的特性[J]. 通信学报, 1998 年 8 月, 19(8): 61-66.

[2] 张文梅等. 带漏泄段同轴电缆激励的 2 GHz 无线电波在大型封闭区域内的传播[J]. 通信学报, 2001 年 7 月, 22(7): 67-73.

[3] 张跃平等. 辐射模缝隙馈源激励的 2 GHz 无线电波在室内的传播[J]. 通信学报, 2002 年 4 月, 23(4): 63-71.

[4] 李冰玉等. 隧道内微波多径传播特性的仿真[J]. 微波学报, 2003 年 12 月, 19(4): 37-41.

[5] Bertoni H L. Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Application[M]. 2000, 527-572.

[6] Chayat , Naftali, " Tentative Criteria for Comparison of Modulation Methods," [R]. IEEE P802. 11-97-96, September, 1997.

[7] Steve Halford , Karen Halford , and Mark Webster , " Evaluating the Performance of HRb Proposals in the Presence of Multipath" [Z]. doc. :IEEE802. 11-00/ 282r2

[8] 张会清、于洪珍等, 矩形隧道中电波多径传播模型的建立及仿真[J]. 电波科学学报, 2008 年 2 月, 23(1): 195-200.

[9] 廖惜春, 丘敏, 麦汉荣, 无线传感网络中多普勒效应的研究与仿真[J]. 传感技术学报, 2007 年 12 月, 12(20): 2674-2678.



周剑玲 (1970-), 女, 陕西富平人, 1994 年毕业于陕西科技大学通信工程专业, 硕士, 华北科技学院讲师, 已经在计算机工程与应用, 计算机应用等杂志发表 论文多篇, 从事移动通信与网络通信的研究, jlingzhou @ncist. edu. cn



冉小英 (1980-), 女, 四川射洪人, 硕士, 毕业于北京交通大学通信与信息系统专业。现任华北科技学院通信教研室 讲师。



于 臻 (1980-), 男, 河北邯郸人, 2007 年毕业于中国传媒大学通信与信息系统专业, 硕士, 华北科技学院讲师, 从事 天线与无线电波传播研究。