

# 预测隧道中传播损耗的混合模型

张跃平, 张文梅, 郑国莘, 盛剑桓

(太原理工大学, 山西太原 030024)

**摘要:** 本文运用 Fresnel 区域理论, 得到了计算转折点距离的公式, 结合自由空间传播模型和修正的波导模型, 提出了一种新的混合模型. 各种条件下的实验数据都验证了模型的合理性. 结果表明, 转折点以前的传播损耗可用自由空间的传播模型预测, 而在转折点之后, 可通过修正的波导模型预测.

**关键词:** 无线电波的传播; 蜂窝无线通信; 隧道

**中图分类号:** TN011.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 09-1283-04

## A Hybrid Model for Propagation Loss Prediction in Tunnels

ZHANG Yue-ping, ZHANG Wen-mei, ZHENG Guo-xin, SHENG Jian-huan

(Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract:** The Fresnel zone theory is employed to determine the boundary to distinguish propagation regions for line-of sight topographies in tunnels. The formula for calculating the break point distance is obtained. A hybrid propagation model combining the free space propagation model and the modified waveguide propagation model is proposed. The hybrid model and the break point distance formula are validated with our own and other published experimental data in various tunnels and at different frequencies. It is shown that the free space propagation model can be used to predict propagation loss in region prior to the break point, while the modified waveguide propagation model offers excellent prediction of propagation loss after break point.

**Key words:** radio propagation; personal microcellular radio communication; tunnel

### 1 引言

从目前个人移动通信发展的情况看, 采用蜂窝式小区结构是更有效地利用有限频谱的一个发展方向. 为了实现优化设计, 必须掌握无线电波的传播机理, 预测短距离内的传播损耗. 为此, 国内外学者做过很多的工作, 但都局限于基站和移动台都位于开放空间的情况. 实际上, 移动台还经常进入类似隧道的地下空间. 目前, 隧道中的通信都采用漏泄馈源, 早期的漏泄系统工作于 450MHz<sup>[1]</sup>, 目前是在 800 或 900MHz<sup>[2,3]</sup>. 从技术上讲, 漏泄系统可工作于 2 GHz, 在这么高的频率上, 无线电波的传播损耗不会过高, 这样, 对于短隧道, 以自由传播为基础的无线通信优于漏泄通信; 而对于长隧道, 可采用蜂窝式小区结构<sup>[4-6]</sup>. 一般的小区大小只有几百米, 在这样短的距离内, 电波传播的区域大部分在近区, 远区和近区具有不同的传播特性, 因此, 在进行小区设计时, 必须区分传播区域.

### 2 隧道中传播区域的划分

在理论上, 可以认为隧道是超大尺寸的非理想波导, 频率高于其截止频率的波才能在其中传播. 大多数隧道的截止频率约为数十 MHz, 目前移动通信采用的频段远高于几十 MHz,

这个频段的信号在隧道中传播时必为多模传播, 各个模式的损耗与其阶数的平方成正比<sup>[7]</sup>. 因此, 可将隧道分为近区和远区两个传播区域. 在近区, 导引传播尚未建立起来, 波在这个区域主要为多模传播; 而在远区, 波的传播方式主要是稳定的导引传播, 两个传播区域的转折点可通过 Fresnel 区域<sup>[8]</sup>理论来确定.

Fresnel 区域是以发射和接收天线为焦点的椭球体, 如果发射与接收天线之间的距离为  $d$ , 那么椭球体上任一点到两个天线的距离和与  $d$  的差为一常数  $q\lambda/2$ , 其中,  $q$  为正整数,  $\lambda$  为电磁波在自由空间的波长.  $q=1$  时, 椭球体所包围的区域称为第一 Fresnel 区,  $q=1$  和  $q=2$  的椭球体之间的区域为第二 Fresnel 区, 依此类推. 现在假想有一个垂直于发射和接收天线连线的平面, 那么这个平面与椭球体的交线为一系列的同心圆, 除了天线的临近区域, 同心圆的半径可表示为

$$r_q = \sqrt{\frac{q\lambda d_1 d_2}{d}} \quad (1)$$

式中  $d = d_1 + d_2$ ,  $d_1$ 、 $d_2$  分别为发射、接收天线到平面的距离. 显然  $r_q$  与假想平面相对于两个天线的位置有关, 假想平面靠近发射或接收天线时,  $r_q$  减小, 位于两个天线中间时,  $r_q$  最

收稿日期: 2000-07-21; 修回日期: 2001-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(No. 69972030)和山西省自然科学基金(No. 991042)

大,  $r_q$  的最大值  $r_{qmax}$  为

$$r_{qmax} = \frac{1}{2} \sqrt{\varphi \lambda d} \quad (2)$$

如果隧道的宽为  $w$ , 高为  $h$ , 令  $r_{qmax} = w/2$ , 则

$$d = \frac{w^2}{\varphi \lambda} \quad (3)$$

令  $r_{qmax} = h/2$ , 则

$$d = \frac{h^2}{\varphi \lambda} \quad (4)$$

如果定义第一 Fresnel 区开始被阻断时, 两个天线之间的距离为转折点, 那么, 可以得到障碍物为左右壁和上下壁时的转折点分别为式(5)、(6)

$$d = \frac{h^2}{\lambda} \quad (5)$$

$$d = \frac{w^2}{\lambda} \quad (6)$$

隧道中两种传播区域的界面为发射天线到转折点的最大距离, 即

$$d_{NF} = \text{Maximum}\left(\frac{h^2}{\lambda}, \frac{w^2}{\lambda}\right) \quad (7)$$

可见,  $d_{NF}$  与隧道的高或宽的平方成正比, 而与波长成反比. 典型公路隧道的宽为 9 米, 高 5 米, 对应于 900MHz 和 2.0GHz 电磁波的边界分别为 245 米、540 米<sup>[11]</sup>.

### 3 混合传播的模型

根据前面的分析, 可将隧道的传播空间分为两个区域, 在传播距离小于  $d_{NF}$  的近区, 导引传播尚未建立起来, 电磁波的传播方式主要是多模传播, 这种传播方式与波在自由空间的传播类似, 因此, 可以用自由空间的传播模型来计算传播损耗, 即

$$PL(\text{dB}) = -10 \lg \left[ \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (8)$$

而在传播距离大于  $d_{NF}$  的远区, 高次模基本上已被衰减掉, 电磁波主要以主模的形式传播, 与波在波导中的传播类似, 因此这个区域的传播损耗可用波导传播模型来计算. 即总的损耗为

$$PL(\text{dB}) = PL_{11} + PL_r + PL_t \quad (9)$$

式中  $PL_{11}$ 、 $PL_r$ 、 $PL_t$  分别为由于折射、表面粗糙和四壁倾斜所造成的损耗, 在矩形隧道中, 水平和垂直极化主模的折射

损耗分别为<sup>[7]</sup>

$$PL_{11} = 4.343 \lambda^2 \left( \frac{\epsilon_{r1}}{w^3 \sqrt{\epsilon_{r1} - 1}} + \frac{1}{h^3 \sqrt{\epsilon_{r2} - 1}} \right) d \quad (10)$$

$$PL_{11} = 4.343 \lambda^2 \left( \frac{\epsilon_{r1}}{w^3 \sqrt{\epsilon_{r1} - 1}} + \frac{\epsilon_{r2}}{h^3 \sqrt{\epsilon_{r2} - 1}} \right) d \quad (11)$$

式中,  $\epsilon_{r1}$ 、 $\epsilon_{r2}$  分别为隧道侧壁和上下壁的相对介电常数. 在拱形隧道中的相应值为<sup>[14]</sup>

$$PL_{11} = 5.0 \lambda^2 \left( \frac{1}{w^3 \sqrt{\epsilon_r - 1}} + \frac{1}{h^3 \sqrt{\epsilon_r - 1}} \right) d \quad (12)$$

$$PL_{11} = 4.5 \lambda^2 \left( \frac{1}{w^3 \sqrt{\epsilon_r - 1}} + \frac{\epsilon_r}{h^3 \sqrt{\epsilon_r - 1}} \right) d \quad (13)$$

其中  $\epsilon_r$  为拱形隧道壁的相对介电常数.

另外参考文献[7], 可得到由于表面粗糙和倾斜引起的主模损耗分别为

$$PL_r = 4.343 \pi^2 r^2 \lambda \left( \frac{1}{w^4} + \frac{1}{h^4} \right) d \quad (14)$$

$$PL_t = \frac{4.343 \pi^2 \theta^2}{\lambda} d \quad (15)$$

式(15)中  $\theta$  表示倾斜角的均方根值, 该表达式只能用于倾斜角很小, 且传输信号频率较低时. 下面, 将给出倾斜损耗的准确计算公式.

在无倾斜的矩形隧道中, 主模的电场为

$$E_x = E_0 \cos(k_1 x) \cos(k_2 y) \exp(-jk_3 z) \quad (16)$$

当侧壁相对于垂直面的倾斜角为  $\theta$  时,  $E_x$  变为

$$E_{xx} = E_0 \cos(k_1 x) \cos(k_2 y) \exp[-jk_3(d \cos 2\theta + x \sin 2\theta)] \quad (17)$$

这样, 侧壁倾斜时的场  $E_{xx}$  与主模电场  $E_x$  的功率耦合因子  $C_{f1}(\theta)$  为

$$C_{f1}(\theta) = \frac{\left| \iint E_x E_{xx}^* dx dy \right|^2}{\iint |E_x|^2 dx dy \iint |E_{xx}^*|^2 dx dy} \quad (18)$$

式中的积分路径是沿隧道的横截面, \* 表面共轭.

根据同样的道理, 可得到上下壁相对于水平面的倾角为  $\phi$  时的功率耦合因子  $C_{f2}(\phi)$ . 传播距离为  $d$  时, 倾斜造成的总损耗为

$$C_f(\phi, \theta) = [C_{f1}(\theta)]^{(\pi d/k_0 w^2)} [C_{f2}(\phi)]^{(\pi d/k_0 h^2)} \quad (19)$$

用 dB 表示则为

$$PL_t = 10 \lg C_f(\theta, \phi) \quad (20)$$

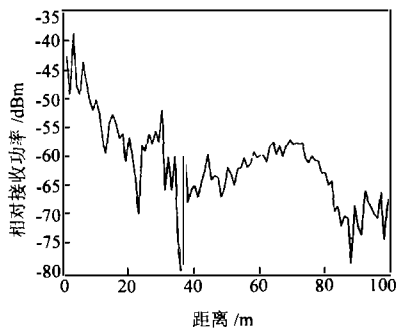


图 1 水平极化波的相对接收功率

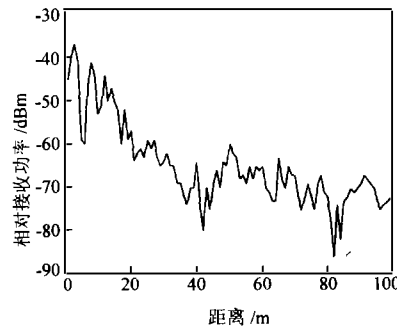


图 2 垂直极化波的相对接收功率

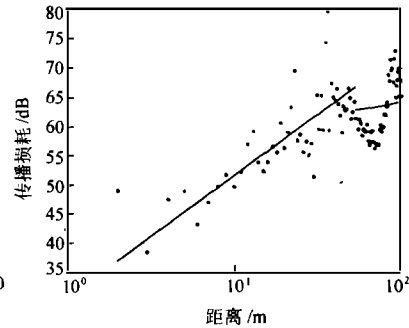


图 3 900MHz 水平极化波的预测和实测损耗

式(8)~(14)和式(16)~(20)即为混合传播,用这个模型,可预测电磁波在隧道中的传播损耗,有关插入损耗的计算,可参阅文献[1,7].

#### 4 实验验证

为了验证混合模型的正确性,我们将模拟结果与实验结果进行了比较,比较结果见图1~7,其中图3~7中,实线为模型预测结果,\*线为测量结果.

图1和图2是在空直井巷中,发射信号为900MHz水平和垂直极化波时的相对接收功率,巷道宽4.2米,高3.0米.从

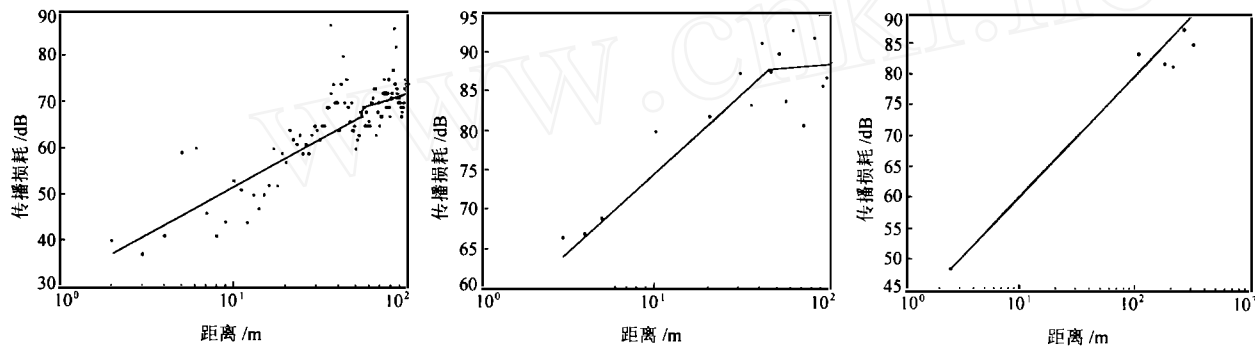


图4 900MHz垂直极化波的预测和实测损耗 图5 1.7GHz垂直极化波的预测和实测损耗 图6 2.538GHz垂直极化波的预测和实测损耗

图3和图4给出了在空直井下运输巷中,900MHz水平和垂直极化波的传播损耗,其中,实线为预测结果,\*线为测量结果.对于水平极化波,混合模型预测结果的平均误差和标准偏差分别为2.21dB、6.78dB;对垂直极化波的相应值为6.94dB.可见,混合模型预测的传播损耗与实际测量结果相吻合.

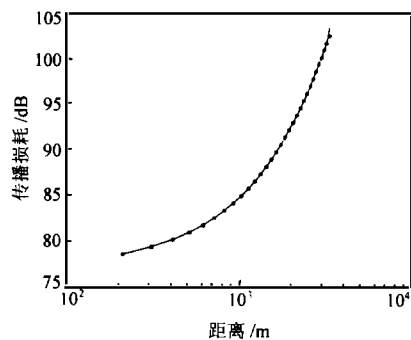


图7 远区的预测和实测损耗

图5是在拱形铁路隧道中,实测<sup>[11]</sup>和预测的传播损耗的比较,传输波为1.7GHz垂直极化波,隧道宽8.8米,高7.3米,隧道壁相对介电常数为5.5.从图中可以看出,实际测量的两种传播区域的边界在距发射天线420米处,而预测值为438米,与测量值很接近;在分界点前后,预测结果与测量值很吻合,预测结果的最大误差小于9dB,误差的平均值为1.13dB,标准偏差为4.2dB.

图6是在宽8米,高5.4米地铁隧道中,实测<sup>[12]</sup>和预测的传播损耗的比较,传输波为2.538GHz垂直极化波,理论计算的两种传播区域的边界在距发射天线542米处,因此,实验数据只有近区数据,只用自由空间的传播模型即可预测传播损

两个图中都可以看出,两种不同区域的分界点在45米处,传播距离小于45米时,接收功率下降很快;而在45后,接收功率的变化很缓慢.混合模型计算的分界点在53米处.

另外,我们还在一个空隧道的入口通道进行了测量,隧道宽3米,高3米,倾斜角的均方根值为3.67°.测量结果为:工作频率为900MHz时,主模的总损耗为33dB/100m<sup>[15]</sup>.混合传播模型预测的总损耗为38dB/100m,其中由于倾斜产生的损耗为32dB/100m.而通过式(15)计算的相应值分别为64dB/100m、58dB/100m.可见,混合传播模型预测的结果更加准确.

耗,预测结果的误差小于5dB.

图7是对900MHz垂直极化波远区测量结果<sup>[13]</sup>和预测量结果的比较,隧道长3.5千米,宽8.5米,高5.3米,隧道壁相对介电常数为5.理论计算的边界在距发射天线219米处,实验数据只有远场区数据.由图可见,修正的波导模型很好地预测了传播损耗.

#### 5 结论

本文运用Fresnel区域理论,得到了计算转折点距离的公式,实验结果也验证了该公式的正确性;结合自由空间传播模型和修正的波导模型,提出了一种新的预测传播损耗的混合传播模型.即,转折点以前的传播损耗可用自由空间的传播模型预测,而在转折点之后,可通过修正的波导模型预测.各种条件下的实验数据都验证了模型的合理性.这个新的混合传播模型将为隧道微蜂窝结构的设计提供理论基础.

#### 参考文献:

- [1] P Delogne, Leaky Feeders and Subsurface Radio Communication[M]. Peter Peregrinus. Ltd, 1982.
- [2] T Suzuki, T Hanazawa, S Kozono. Design of a tunnel relay system with a leaky coaxial cable in an 800MHz band land mobile telephone system [J]. IEEE Trans. veh. Technol., August, 1980, 29(3): 305 - 316
- [3] K H Yip. Digital Mobile Radio Communications in Hong Kong MTR Tunnels[M]. Private Communications.
- [4] R Steels. Towards a high capacity digital cellular mobile radio system [J]. IEE Proc. - F, August, 1985, 132(5): 405 - 415.
- [5] Y P Zhang, Y Hwang. Characterization of UHF radio propagation channels in tunnel environments for microcellular and personal commun-

- tions[J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1998, 47(1): 283 - 296.
- [ 6 ] T Klemenschits, E Bonek. Radio coverage of road tunnels at 900 and 1800 MHz by discrete antennas[A]. Proc of the Fifth International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications [C], the Hague, the Netherlands, September 18 - 22, 1994, 2: 411 - 415.
- [ 7 ] A G Emslie, R L Lagace, P F Strong. Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., March, 1975, 23(2): 192 - 205.
- [ 8 ] J D Parsons. The Mobile Radio Propagation. Channe[M]. London, Pentech Press, 1992.
- [ 9 ] Y Yamaguchi, T Abe, T Sekiguchi, J Chiba. Attenuation constants of UHF radio waves in arched tunnels[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Techn., August 1985, 33(8): 714 - 718.
- [ 10 ] G X Zheng, J H Sheng, Y P Zhang. Propagation of UHF radio waves in trapezoidal tunne[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1999, 20(5).
- [ 11 ] J Chiba, T Inaba, Y Kuwamoto, O Banno, R Sato. Radio communication in tunnels [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. June 1978, 26(6): 439 - 443
- [ 12 ] S Shinozaki, M Wada, A Teeanishi, H Furukawa, Y Akaiwa. Radio propagation characteristics in subway platform and tunnel in 2.5 GHz band[J]. Proc of the Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications[C] Toronto, Canada September 27 - 29, 1995, 3: 1175 - 1179.
- [ 13 ] Mariage M Lienard, P Degauque. Theoretical and experimental approach of the propagation of high frequency waves in road tunnels[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, January, 1994, 42(1): 75 - 81.

#### 作者简介:

**张跃平** 男. 1958 年生于山西太原, 博士, 太原理工大学教授, 1982 年毕业于太原工业大学无线电工程系, 1987 年在山西矿业学院获硕士学位, 1992 年在香港中文大学获博士学位. 曾留学于英国利物浦大学, 执教于香港大学和新加坡南洋理工大学等学校, 是 IEEE Transaction on Vehi. Tech. 的审稿人. 主要研究方向是无线电移动通信和限定空间的电磁波传播. 在国内外期刊发表论文 40 余篇.

**张文梅** 女. 1969 年生于山西太谷. 1995 年在南京理工大学获硕士学位, 现为太原理工大学讲师, 主要研究方向是无线电移动通信和限定空间的电磁波传播. 在国内期刊发表论文 5 篇.