

# 融合波模和射线理论的矿井电波传播模型

霍 羽<sup>1,2</sup>, 徐 钊<sup>1,2</sup>, 刘逢雪<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心, 江苏徐州 221008; 2. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏徐州 221008)

**摘 要:** 本文提出了电波在煤矿井巷内传播的融合模型: 利用波导波模理论修正射线模型, 确定巷道内源射线的个数及其离开发射机的方向; 通过几何光学基本定律证明矩形巷道内射线传播路径投影的反射定律和夹角定律, 推导出射线到达接收天线所在巷道截面的位置、经历的反射次数、路径长度等与射线离开角的关系, 以改进主动射线跟踪法, 简化计算; 运用接收球原理判断各射线经反射后能否到达接收机。经仿真并与实测数据比较, 验证了模型的正确性。

**关键词:** 波导波模; 射线发射; 射线跟踪; 射线数量; 离开角; 巷道

**中图分类号:** TD655, TN92      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013)01-0110-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.01.020

## A Wave Propagation Model Combined the Modal Theory and Ray Theory in Coal Mine Tunnels

HUO Yu<sup>1,2</sup>, XU Zhao<sup>1,2</sup>, LIU Feng-xue<sup>1,2</sup>

(1. IOT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

**Abstract:** We develop a fusion model of electromagnetic waves propagation in coal mine tunnels. We modify the ray model by the modal theory of dielectric waveguide. By this approach we decide how many rays are launched, as well as their angles of departure (AOD). According to the theory of geometrical optics, we prove the reflection law and the included angle law of the projection of the propagation path of a ray in a rectangular tunnel. On this basis, we deduce the arriving position, the reflection number and the traveling distance of a ray as functions of its AOD when the ray hits the cross section where the receiver is located. We decide whether a ray hits the receiver or not by the reception spheres. Finally, the theoretical model is validated by experimental measurements.

**Key words:** waveguide mode; ray launching; ray tracing; rays number; angle of departure; tunnel

### 1 引言

准确合理的电磁波传播模型, 对预测分析井巷无线信道、规划设计井下无线通信系统起着至关重要的作用。目前主要运用的分析仿真模型有波导模型和射线模型。

在波导模型里, 巷道被视作巨大的有损耗的介质波导, 巷道内电磁波的传播是多个波模共同作用的结果<sup>[1-3]</sup>。巷道波导模型的缺陷在于不能提供各波模的强度, 波模强度是由激励源决定的, 因此如果要描述完整的通信链路的功率传输, 则必须根据天线的电流分布、边界条件以及井巷传播模式的正交性建立积分方程, 具体天线具体分析<sup>[4]</sup>, 这一过程比较繁琐, 普适性差。

射线模型能够提供完整的功率传输公式, 它只需发

射天线的输入功率  $P_t$ 、收发天线增益  $G_i$ 、波长  $\lambda$ 、各射线的传播距离  $r_i$ 、角度信息及反射次数就可以确定接收天线的接收功率  $P_r$ <sup>[5]</sup>:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left| \frac{\lambda}{4\pi} \sum_i \frac{\sqrt{G_i R_1^{(i)} R_2^{(i)}} \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} r_i)}{r_i} \right|^2 \quad (1)$$

式中  $R_1$  和  $R_2$  分别是第  $i$  条路径在巷道侧壁及顶底壁的反射系数, 它们是关于巷道壁电参数、射线掠射角以及反射次数的函数。由于现有的射线模型只简单认为载波波长很小时, 巷道内源射线有无数多条, 接收功率是收发天线间所有几何可能路径的叠加, 这些路径在理论上也有无数条<sup>[5-10]</sup>。所以式(1)中的射线角度、反射次数和路径长度均与载波频率无关, 由此推断, 发射功率一定时, 巷道内的载波频率越大, 接收功率越小。但是

在实际巷道中的测量结果<sup>[11,12]</sup>以及井巷波导理论<sup>[3]</sup>否定了这一结论,指出巷道内载波频率越大,接收功率应该越大.所以,巷道内源射线的方向及个数有待讨论.

文献[13]还提出一种混合模型.混合模型采用一个分界点将信道划分为近场区和远场区.在近场区,即距离发射天线较近的区域,信道预测采用自由空间电磁波传播模型;在远场区,信道预测采用以基模传播为主的波导模型.但是实际上,近场区以多波模传播为主到远场区以基模传播为主的变化过程应该是连续的,因此不可能存在一个准确的近、远场区的分界点.而且,这种模型不能描绘巷道内的多径衰落和起伏.

本文提出的融合模型,利用波导波模理论修正射线模型以确定源射线的方向和数量;通过几何光学定律改进主动射线跟踪法以简化计算,并运用接收球原理判断各射线经反射后能否到达接收机,从而构成一种新的确定性模型体系.

## 2 融合模型

实际应用中,巷道的截面形状主要介于矩形和圆形之间,而矩形波导中各模式的衰减及分布与圆形波导基本一致<sup>[14]</sup>;巷道内信号的传播损耗很大,往往是按视距分段,每段由一个天线覆盖<sup>[15]</sup>,因此本文主要针对矩形空直巷道建模.

### 2.1 源射线方向及数量

射线模型本质是波导模型的近似,当载波波长比巷道截面尺寸小很多时,每个波模的传播过程都可用一条射线近似<sup>[5]</sup>.因此,利用波导波模理论修正射线模型,可以确定巷道内源射线的个数及其离开发射机的方向.

在波导内,传播模式的数量是满足麦克斯韦方程和边界条件的所有可能解.作者曾在文献[1]中对此进行了讨论.

假设巷道横截面宽为  $w$ ,高为  $h$ .  $m$  为波模在水平方向的半波变化数,  $n$  为波模在垂直方向的半波变化数,  $m = 0, 1, 2, \dots, m_{\max}$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots, n_{\max}$ , 且  $m$ 、 $n$  不能同时为 0. 当  $(m, n)$  次波模被近似成射线时,假设射线入射到两侧壁和上下两壁的掠射角分别为  $\phi_1$  和  $\phi_2$ , 则

$$\sin \phi_1 = \frac{m\lambda}{2w}; \sin \phi_2 = \frac{n\lambda}{2h} \quad (2)$$

由式(2)可得传播模式的最高阶数

$$m_{\max} = \frac{2w}{\lambda}; n_{\max} = \frac{2h}{\lambda} \quad (3)$$

由于矩形巷道几何结构对称,波模应该前后左右上下对称存在<sup>[16]</sup>,所以传播模式的总个数  $M$  应为

$$\begin{aligned} M &= 2[(2m_{\max} + 1)(2n_{\max} + 1) - 1] \\ &= \frac{32wh}{\lambda^2} + \frac{8}{\lambda}(w + h) \end{aligned} \quad (4)$$

源射线的数目随之确定,等于  $M$ . 巷道内适于无线信号传播的载波频率一般在 UHF 频段<sup>[17,18]</sup>,对应的波长为  $1\text{m} \sim 0.1\text{m}$ ,而井下巷道的截面尺寸一般为几米,根据式(4),在这个频段范围,巷道内源射线的数量为几百到几千个,远小于无数条,并且是与巷道截面尺寸成正比、与载波波长成反比的有限变量.

根据式(2)可以推导  $(m, n)$  波模对应路径的离开角(Angle Of Departure, AOD),分别用方位角  $\phi$  和俯仰角  $\theta$  表示.其中  $\theta$  是  $(m, n)$  波模与  $y$  轴的夹角,范围为  $[0, \pi]$ ;  $\phi$  是  $(m, n)$  波模在水平面的投影与  $x$  轴的夹角,范围为  $[0, 2\pi]$ .图 1 绘出 3 维空间直角坐标系中直线及其角度描述参数.

由射线掠射角与离开角的关系可得,

$$\begin{aligned} \phi &= \delta\pi + \frac{\pi}{2} \pm \arcsin\left(\frac{\sin \phi_1}{\cos \phi_2}\right) \\ &= \delta\pi + \frac{\pi}{2} \pm \arcsin\left(\frac{m\lambda h}{w\sqrt{4h^2 - n^2\lambda^2}}\right); \\ \theta &= \frac{\pi}{2} \pm \phi_2 = \frac{\pi}{2} \pm \arcsin\left(\frac{n\lambda}{2h}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

当接收天线位于发射天线前侧时,  $\delta = 0$ ; 当接收天线位于发射天线后侧时,  $\delta = 1$ .

由式(5),因为发射天线与巷道波导结构的耦合,发射天线不能在任一方向都激励出射线传播能量,  $\phi$  和  $\theta$  是关于巷道截面尺寸和载波波长的离散变量,而且角度间隔不均等.

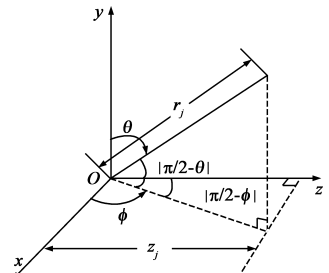


图1 射线的3维空间描述参数

### 2.2 射线传播规律

#### 2.2.1 三维螺旋射线

在确定了井巷内源射线的数量和方向后,可以利用主动射线法从源点出发沿各可能方向对射线进行跟踪,以获取射线到达接收机所在截面的信息.

现有的主动射线法都采用逐步跟踪的方法,即射线每发生一次反射、散射便计算、比较一次<sup>[9,10,19]</sup>,但是巷道内多为三维螺旋射线,这种迭代过程复杂繁琐.本文利用巷道几何结构的特点,根据基本几何光学定律,证明矩形空直巷道内射线传播路径投影的反射定律和夹角定律,以确定射线到达接收机所在巷道横截面的位置、经历的反射次数、路径长度与射线 AOD 的关系,改进传统的主动射线跟踪法,简化计算.

图2描述了矩形空直巷道内一条常见的三维旋进射线. 巷道中采用直角坐标系, 原点位于截面中心,  $x$ 、 $y$ 轴分别沿截面的宽度和高度方向,  $z$ 轴沿巷道长度方向. 点  $S$  代表发射天线, 坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 点  $D$  代表接收天线, 坐标为  $(x, y, z)$ . 射线从  $S$  点出发到  $D$  所在巷道横截面的位置为  $D'$ , 坐标为  $(x', y', z)$ . 设射线  $SD'$  在巷道内经两个侧壁反射  $N_1$  次、顶底壁反射  $N_2$  次, 则总的反射次数为  $N_1 + N_2$  次. 当  $N_1$  或  $N_2$  为 0 时, 射线只在二维平面反射; 而当  $N_1$ 、 $N_2$  同时为 0 时, 射线为直射射线, 这两种射线都是三维旋进射线的特例.

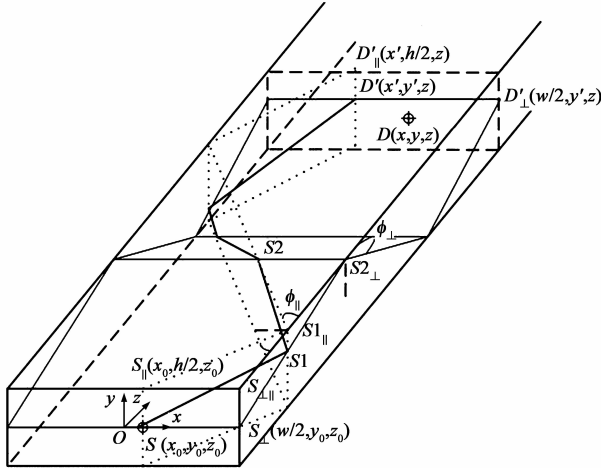


图2 矩形巷道三维旋进射线

### 2.2.2 投影反射定律

根据光的反射定律: 入射射线、反射射线位于同一平面, 即入射面; 入射角等于反射角. 以图2中射线为例, 画出射线每一次反射的入射面, 于是得到两类平面: 第 I 类入射面垂直于巷道顶底壁; 第 II 类入射面垂直于巷道侧壁. 将第 I 类入射面投影到巷道沿  $z$  轴的水平壁上, 即巷道顶底壁, 收发端在顶壁的投影用  $S_{\parallel}$  和  $D'_{\parallel}$  表示, 其在直角坐标系中的位置分别为  $(x_0, h/2, z_0)$  和  $(x', h/2, z)$ , 折线  $S_{\parallel}D'_{\parallel}$  即为三维旋进射线  $SD$  的水平投影; 将第 II 类入射面投影到巷道沿  $z$  轴的垂直壁上, 即巷道侧壁, 得到三维旋进射线  $SD$  的垂直投影  $S_{\perp}D'_{\perp}$ ,  $S_{\perp}$  和  $D'_{\perp}$  分别表示收发端在巷道右侧壁的投影, 其坐标分别为  $(w/2, y_0, z_0)$  和  $(w/2, y', z)$ .

**投影反射定律:** 矩形空直巷道内三维旋进射线的水平投影和垂直投影的传播仍满足光的反射定律. 水平投影的反射次数等于其在巷道两侧壁之间的反射次数; 垂直投影的反射次数等于其在巷道顶底壁之间的反射次数.

证明如下:

①首先考察射线  $SD$  的水平投影. 观察图2中的  $Rt\Delta SS_1S_{\perp}$  与  $Rt\Delta S_2S_1S_2_{\perp}$ ,  $S_{\perp}$  是点  $S$  在巷道垂直壁的投影,  $S_2_{\perp}$  是反射点  $S_2$  在巷道垂直壁的投影, 故

$\angle SS_1S_{\perp}$  和  $\angle S_2S_1S_2_{\perp}$  分别是射线  $SS_1$  和  $S_1S_2$  在巷道侧壁的掠射角, 由于射线传播符合光的反射定律,  $\angle SS_1S_{\perp} = \angle S_2S_1S_2_{\perp}$ , 可得  $Rt\Delta SS_1S_{\perp}$  与  $Rt\Delta S_2S_1S_2_{\perp}$  相似, 则  $\frac{S_2S_2_{\perp}}{SS_{\perp}} = \frac{S_2_{\perp}S_1}{S_1S_{\perp}}$ .

②观察  $Rt\Delta S_2_{\perp}S_{\perp}S_{\parallel}$ , 因为  $S_1 \parallel S_1 \parallel S_{\perp}S_{\parallel}$ , 所以  $\frac{S_2_{\perp}S_1}{S_1S_{\perp}} = \frac{S_2_{\perp}S_{\parallel}}{S_1 \parallel S_{\perp}}$ .

③由①和②,  $\frac{S_2S_2_{\perp}}{SS_{\perp}} = \frac{S_2_{\perp}S_{\parallel}}{S_1 \parallel S_{\perp}}$ , 因为矩形  $S_{\parallel}S_{\perp}$

$S_{\perp} \parallel S_{\parallel}$  中,  $S_{\parallel}S_{\perp} = SS_{\perp}$ , 所以  $\frac{S_2S_2_{\perp}}{S_{\parallel}S_{\perp}} = \frac{S_2_{\perp}S_{\parallel}}{S_1 \parallel S_{\perp}}$ .

④  $S_2_{\perp}$  是点  $S_2$  的投影, 即  $S_2S_2_{\perp} \perp S_2_{\perp}S_1 \parallel$ , 则  $\angle S_{\parallel}S_{\perp}S_1 \parallel = \angle S_2S_2_{\perp}S_1 \parallel = 90^\circ$ .

⑤由③和④,  $Rt\Delta S_{\parallel}S_{\perp}S_1 \parallel$  与  $Rt\Delta S_2S_2_{\perp}S_1 \parallel$  相似, 所以  $\angle S_{\perp}S_1 \parallel S_{\parallel} = \angle S_2_{\perp}S_1 \parallel S_2$ , 因此投影  $S_{\parallel}S_1 \parallel$  与投影  $S_1 \parallel S_2$  满足光的反射定律, 依次类推, 整条水平投影  $S_{\parallel}D'_{\parallel}$  的传播都满足光的反射定律. 同理可得, 垂直投影的传播也满足光的反射定律.

⑥从  $S$  点出发的任一射线, 根据它经历的  $N_1 + N_2$  次反射, 可将它分成  $N_1 + N_2 + 1$  段直线段, 针对每一段, 都可同时画出一个第 I 类入射面和一个第 II 类入射面.

⑦根据光的反射定律: 入射射线、法线和反射射线位于同一平面. 所以, 对第 I 类入射面, 每当且仅当射线入射到侧壁发生反射时, 才会在反射点处出现第 I 类入射面的交线. 故经历  $N_1 + N_2$  次反射的射线在  $N_1 + 1$  个第 I 类入射面内纵向前进, 经过  $N_1$  条第 I 类入射面的交线. 因此水平投影在巷道两侧壁之间反射  $N_1$  次. 同理, 垂直投影在巷道顶底壁之间反射  $N_2$  次. 证毕.

### 2.2.3 投影夹角定律

**投影夹角定律:** 在矩形空直巷道内, 对于离开角为  $(\theta, \phi)$  的三维旋进射线上的各段折线, 每段折线的水平投影与纵轴的夹角始终为  $|\delta\pi + \pi/2 - \phi|$ , 每段折线与其水平投影的夹角始终为  $|\pi/2 - \theta|$ .

证明如下:

①根据投影反射定律, 在矩形空直巷道内, 射线的水平投影仍满足光的反射定律, 当射线 AOD 为  $(\theta, \phi)$  时, 射线各段折线的水平投影与纵轴的夹角均相等, 即水平投影在巷道侧壁的掠射角, 根据方位角  $\phi$  的定义, 掠射角大小为  $|\delta\pi + \pi/2 - \phi|$ .

②继续以图2为例, 如果将第 I 类入射面沿  $z$  轴方向拉直, 如图3所示, 假设射线到达点被延展到坐标  $(x', y', z')$  处, 用  $D'$  表示.

③费马原理指出均匀介质中的光波在两点之间沿最短路径传播,因此在展开后的第 I 类入射面内,射线必被展开为发射点、顶底壁反射点和延展后的到达点间的连线.因此,三维旋进射线的各段折线与其在水平面投影的夹角,等于展开后的射线在巷道顶底壁的掠射角.

④由于第 I 类入射面被展开拉直的过程中,射线的长度、射线各点相对于顶底壁的距离都未发生改变,所以射线上各段折线的俯仰角都未改变.

⑤三维旋进射线在顶底壁的反射满足光的反射定律,根据④及射线俯仰角  $\theta$  的定义,展开后的射线在巷道顶底壁的掠射角等于  $|\pi/2 - \theta|$ . 证毕.

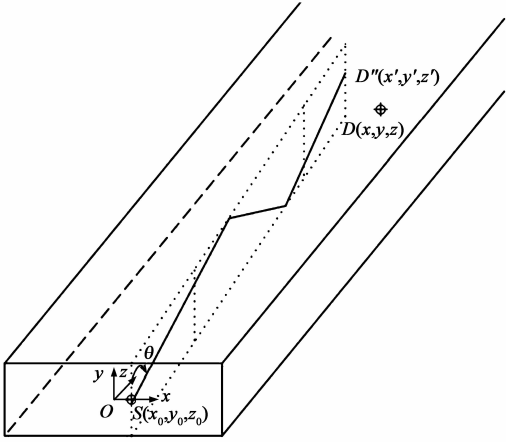


图3 拉直的第 I 类入射面

## 2.3 射线参数计算

为得到每条射线的接收功率,需计算:射线到达接收机所在巷道截面的位置、经历的反射次数、入射到巷道壁的掠射角和路径的长度.

### 2.3.1 到达位置和反射次数

根据投影反射定律,即可将矩形空直巷道内三维旋进射线的跟踪计算简化到二维平面上,通过对射线水平投影和垂直投影的计算,获得射线到达接收机所在巷道截面的位置和经历的反射次数.

假设  $S \parallel D_{\parallel}$  在顶底壁间的掠射角为  $\phi_{\parallel}$ ,  $S_{\perp} D'_{\perp}$  在侧壁间的掠射角为  $\phi_{\perp}$ . 则,

$$\phi_{\parallel} = \left| \delta\pi + \frac{\pi}{2} - \phi \right|; \phi_{\perp} = \arctan \left| \frac{\cos\theta}{\sin\phi \sin\theta} \right| \quad (6)$$

$\phi_{\perp}$  和  $\phi_{\parallel}$  的范围均为  $[0, \pi/2]$ .

图 4 给出了三维旋进射线  $SD'$  水平投影和垂直投影的平面图,分别求得  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $x'$  和  $y'$  如下:

当  $0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$  或  $\frac{3\pi}{2} \leq \phi \leq 2\pi$  时,

$$N_1 = \begin{cases} 0, & |z - z_0| < \frac{\left(\frac{w}{2} - x_0\right)}{\tan\phi_{\parallel}} \\ \left\lfloor \frac{|z - z_0| \tan\phi_{\parallel} - \frac{w}{2} + x_0}{w} \right\rfloor + 1, & |z - z_0| \geq \frac{\left(\frac{w}{2} - x_0\right)}{\tan\phi_{\parallel}} \end{cases} \quad (7)$$

$$x' = (-1)^{N_1 - 1} [N_1 w - (x_0 + |z - z_0| \tan\phi_{\parallel})] \quad (8)$$

当  $\pi/2 < \phi < 3\pi/2$  时,

$$N_1 = \begin{cases} 0, & |z - z_0| < \frac{\left(\frac{w}{2} + x_0\right)}{\tan\phi_{\parallel}} \\ \left\lfloor \frac{|z - z_0| \tan\phi_{\parallel} - \frac{w}{2} - x_0}{w} \right\rfloor + 1, & |z - z_0| \geq \frac{\left(\frac{w}{2} + x_0\right)}{\tan\phi_{\parallel}} \end{cases} \quad (9)$$

$$x' = (-1)^{N_1} [N_1 w + (x_0 - |z - z_0| \tan\phi_{\parallel})] \quad (10)$$

当  $0 \leq \theta \leq \pi/2$  时,

$$N_2 = \begin{cases} 0, & |z - z_0| < \frac{\left(\frac{h}{2} - y_0\right)}{\tan\phi_{\perp}} \\ \left\lfloor \frac{|z - z_0| \tan\phi_{\perp} - \frac{h}{2} + y_0}{h} \right\rfloor + 1, & |z - z_0| \geq \frac{\left(\frac{h}{2} - y_0\right)}{\tan\phi_{\perp}} \end{cases} \quad (11)$$

$$y' = (-1)^{N_2 - 1} [N_2 h - (y_0 + |z - z_0| \tan\phi_{\perp})] \quad (12)$$

当  $\pi/2 < \theta \leq \pi$  时,

$$N_2 = \begin{cases} 0, & |z - z_0| < \frac{\left(\frac{h}{2} + y_0\right)}{\tan\phi_{\perp}} \\ \left\lfloor \frac{|z - z_0| \tan\phi_{\perp} - \frac{h}{2} - y_0}{h} \right\rfloor + 1, & |z - z_0| \geq \frac{\left(\frac{h}{2} + y_0\right)}{\tan\phi_{\perp}} \end{cases} \quad (13)$$

$$y' = (-1)^{N_2} [N_2 h + (y_0 - |z - z_0| \tan\phi_{\perp})] \quad (14)$$

其中,符号  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示取向下取整.

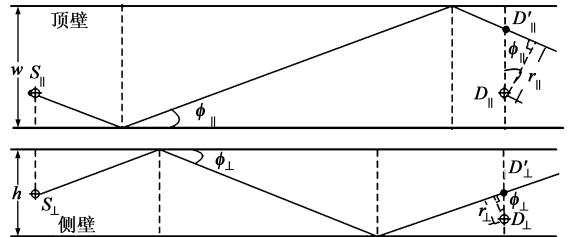


图4 射线在顶壁和侧壁的投影

### 2.3.2 掠射角和射线传播路径长度

根据光的反射定律,因此射线在传播过程中入射到巷道侧壁和顶底壁的掠射角  $\phi_1$  和  $\phi_2$  保持不变,由式 (5) 得,

$$\phi_1 = \arcsin(|\cos\phi| \sin\theta); \phi_2 = |\pi/2 - \theta| \quad (15)$$

根据投影夹角定律,可计算矩形空直巷道内每条射线的传输距离  $r$ . 对于离开角为  $(\theta, \phi)$  的三维旋进射线,假设将其分为若干直线段,对于第  $j$  段,其长度为  $r_j$ ,对应的纵向传播距离为  $z_j$ ,根据图 1,

$$r_j = \frac{z_j}{|\sin\phi| |\sin\theta|}$$

将射线上所有段直线段的长度相加,便可得该条射线所经历的路径长度,

$$r = \sum_j r_j = \frac{\sum_j z_j}{|\sin\phi| |\sin\theta|} = \frac{|z - z_0|}{|\sin\phi| |\sin\theta|} \quad (16)$$

在已知发射天线的输入功率  $P_i$ 、收发天线增益  $G_i$ 、载波波长  $\lambda$  和巷道传播环境参数后,将式(6)(7)(9)(11)(13)(15)(16)代入式(1),即可根据射线 AOD 求得各条射线到达接收机所在巷道截面的功率.

## 2.4 射线接收

在射线跟踪法中,常用接收球判断射线能否被接收天线接收,其方法是在接收天线处,以其为中心,作一半径为  $r_0$  的接收球,如果到达射线与接收天线的距离小于  $r_0$ ,则判定射线被接收,否则没被接收<sup>[20]</sup>.

我们将这个检测过程简化到二维平面内.如图4所示, $D_{\parallel}$ 表示接收天线在顶壁的投影,坐标为  $(x, h/2, z)$ ,水平投影  $S_{\parallel} D_{\parallel}$  到达接收天线处与接收天线的距离为  $r_{\parallel}$ ;  $D_{\perp}$ 表示接收天线在侧壁的投影,坐标为  $(w/2, y, z)$ ,垂直投影  $S_{\perp} D_{\perp}$  到达接收天线处与接收天线的距离为  $r_{\perp}$ .不难看出,

$$\begin{aligned} r_{\parallel} &= |D_{\parallel} D_{\parallel}| \cos \phi_{\parallel} = |x' - x| \cos \phi_{\parallel}; \\ r_{\perp} &= |D_{\perp} D_{\perp}| \cos \phi_{\perp} = |y' - y| \cos \phi_{\perp} \end{aligned} \quad (17)$$

将式(6)(8)(10)(12)(14)代入式(17),即可根据射线 AOD 求得  $r_{\perp}$  和  $r_{\parallel}$ .

这时,射线是否被接收,就取决于  $r_{\perp}$  和  $r_{\parallel}$  是否同时小于  $r_0$ .

## 3 测量与仿真

文献[12]曾在一条 3.5km 长的空直巷道内测量了信号强度随距离的变化曲线.巷道横截面等效为 5.3m

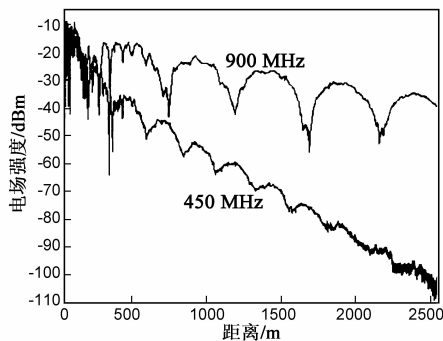
高,7.8m 宽的矩形.收发天线均为垂直极化且被放置在同一水平面上,距地 2m 高,距墙壁 1.95m 宽.考虑两种载波频率:450MHz 和 900MHz.对于前者,收发天线采用半波偶极子天线.对于后者,收发天线则为增益为 7dBi 的宽带喇叭天线.测量结果见图 5(a).

根据上述传播条件,图 5(b)给出几何光学模型<sup>[5]</sup>的仿真结果.本文利用基于镜像法和主动射线跟踪法的帐篷定律侦测收发天线间的所有几何可能路径<sup>[6]</sup>.结果显示,450MHz 的信号强度高于 900MHz,与实测数据相差较大.结合引言中对此结果的推论与分析,可见,不是收发天线间所有几何可能路径都能有效传播信号.

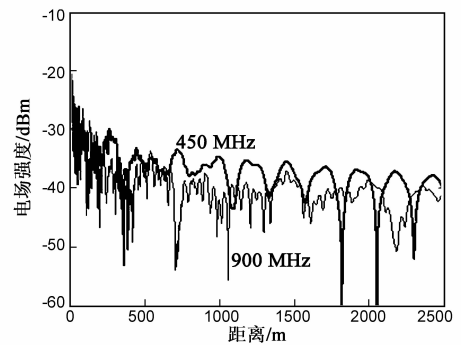
图 5(c)给出了混合模型<sup>[13]</sup>的仿真结果.由于混合模型在近场区采用自由空间电波传播模型,远场区采用基次波导波模传播模型,导致仿真曲线在分界点处出现跃变,信号变化不连续,与实测数据存在差异.而且,仿真结果没有反映信号的多径衰落和起伏.

图 5(d)采用本文提出的融合模型进行仿真.仿真结果与实测数据基本一致,相比于几何光学模型和混合模型更为准确.显然,考虑巷道内有效射线必须与波导波模相匹配是合理的.

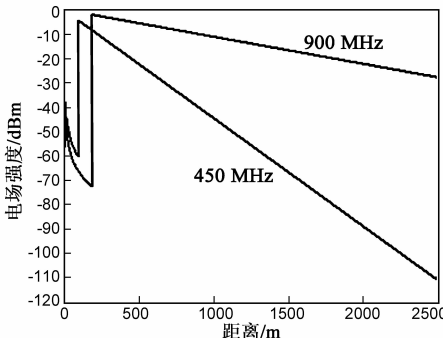
实测和仿真结果都显示,在所考察频段,随着频率的升高,电磁波传播损耗减小.分析其原因,载波频率越高,电磁波波长相对于巷道截面尺寸越小,电磁波传播空间越广阔.由于井下巷道近似于介质波导,巷道内



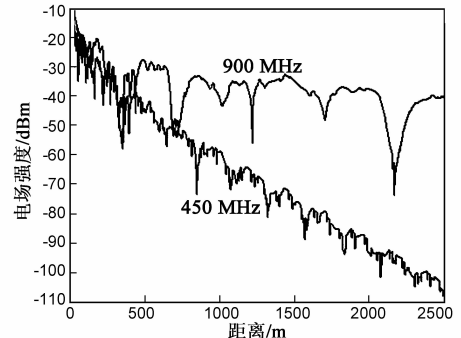
(a) 文献[12]的测量结果



(b) 基于几何光学模型的仿真结果



(c) 基于混合模型的仿真结果



(d) 基于融合模型的仿真结果

图5 接收信号强度随距离的变化曲线,载波频率分别为450MHz和900MHz

传播模式的存在受其截止频率的限制,载波频率越高,可激励的传播模式越多,在多波模共同作用下,接收信号强度随频率增加.根据本文提出的融合模型,也可以得出同样结论.由式(5)和(16),载波频率越高,对每个波模,其对应路径的 AOD 越接近  $\pi/2$ ,即射线的发射越近似于与巷道纵轴平行,因此射线入射到巷道壁的掠射角减小,在收发天线距离不变的情况下,反射次数减少,传播路径的总长度减小,相应的反射损耗和传播损耗降低.由式(4),巷道内有效射线的数量随载波频率的升高而增多.因此,在发射功率一定的情况下,接收机的接收功率随频率增加.

## 4 结论

本文融合了波导理论和射线模型,提出了一种新的适用于井巷环境的电磁波传播模型.首先,利用波导理论确定巷道内源射线的方向和数量.根据波导理论,巷道内可能存在的射线数量是有限的,各射线的离开角是离散值,它们均是关于巷道截面尺寸和载波频率的函数,不能随意确定.然后,根据几何光学基本定律,证明了矩形空直巷道内射线传播路径的投影反射定律和投影夹角定律,推导出射线到达接收面的位置、传播过程中经历的反射次数、入射到巷道壁的掠射角、路径长度与射线离开角的关系,对主动射线法进行改进,避免了传统主动射线法对三维射线复杂繁琐的迭代跟踪计算,降低了计算量.最后利用接收球判断射线是否被接收.通过与实际测量数据相比较,验证了考虑巷道内有效射线必须与波导波模相匹配的融合模型的合理性.

## 参考文献

- [1] 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.  
Huo Yu, Xu Zhao, Zheng Hong-dang. Characteristics of multi-mode propagation in rectangular tunnels [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 12(6): 1225-1230. (in Chinese)
- [2] 孙继平,凌成飞.矩形隧道中电磁波传播模式的分析[J].电波科学学报,2005,20(4):522-525.  
Sun Ji-ping, Cheng Ling-fei. Analysis of electromagnetic wave propagation modes in rectangular tunnel [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(4): 522-525. (in Chinese)
- [3] Sun Z, Akyidiz Ian F. Channel modeling and analysis for wireless networks in underground mines and road tunnels [J]. IEEE Transaction on Communications, 2010, 58(6): 1758-1768.
- [4] 孙继平,高美凤.矩形巷道中对称振子天线辐射特性的研究[J].煤炭学报,2010,35(12):2121-2124.  
SUN Ji-ping, Gao Mei-feng. Research on the radiation characteristics of symmetrical dipole antenna in rectangular tunnel

- [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2121-2124. (in Chinese)
- [5] Mahmoud S F, Wait J R. Geometrical optical approach for electromagnetic wave propagation in rectangular mine tunnels [J]. Radio Sci, 1974, 9: 1147-1158.
- [6] 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 Communications, 2002, 23(11): 41-50. (in Chinese)
- [7] 张会清,于洪珍,王普等.矩形隧道中电波多径传播模型的建立与仿真[J].电波科学学报,2008,23(1):195-200.  
Zhang Hui-qing, Yu Hong-zhen, Wang Pu, et al. Multipath transmission modeling and simulating of electromagnetic wave in rectangle tunnel [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(1): 195-200. (in Chinese)
- [8] Zhang Y P, Hong H J. Ray-optical modeling of simulcast radio propagation channels in tunnels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(6): 1800-1808.
- [9] Chen S H, Jeng S K. SBR image approach for radio wave propagation in tunnels with and without traffic [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1996, 45(3): 570-578.
- [10] 郑国莘,张跃平,盛剑桓,张文梅.无线电波在隧道蜂窝环境中传播特性的 UTD 预测[J].电子学报,1998,26(12):26-30.  
Zheng Guo-shen, Zhang Yue-ping, Sheng Jian-huan, Zhang Weng-mei. UTD prediction of radio wave propagation characteristics in tunnel microcellular environments [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(12): 26-30. (in Chinese)
- [11] Djadel M, Despains C, S Affes. Narrowband propagation characteristics at 2.45 and 18GHz in underground mining environments [A]. Proceedings of Global Telecommunications Conference [C]. Taipei, Taiwan: GLOBECOM IEEE, 2002. 1870-1874.
- [12] Dudley D G, Lienard M, S F Mahmoud, et al. Wireless propagation in tunnels [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007, 49(2): 11-26.
- [13] 张跃平,张文梅,郑国莘,盛剑桓.预测隧道中传波损耗的混合模型[J].电子学报,2001,29(9):1283-1286.  
Zhang Yue-ping, Zhang Weng-mei, Zheng Guo-shen, Sheng Jian-huan. A hybrid model for propagation loss prediction in tunnels [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1283-1286. (in Chinese)
- [14] Lienard M, Degauque P. Natural wave propagation in mine environments [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagations, 2000, 48(9): 1326-1339.
- [15] Liu X L, Zhang Y P, Lian S NG. Design and implementation of a novel network for underground wireless communications [A]. Proceedings of second International Symposium on Com-

munication Systems Networks and Digital Signal Processing [C]. Bournemouth, U K: Bournemouth University, 2000. 88 – 90.

- [16] Alessandro C, Bruno S. Using a pair of phased antennas to improve UHF reception/transmission in tunnels [J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 2000, 42(5): 40 – 47.
- [17] 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.
- [18] 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.  
SUN Ji-ping, Li Ji-sheng, LEI Shu-ying. Choice of optimal frequency for radio communication in mine tunnel [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(3): 378 – 380. (in Chinese)
- [19] 周力, 毛钧杰, 柴舜连. 基于三维射线跟踪的城市微小区电波传播预测算法 [J]. 电子学报, 2002, 30(3): 434 – 436.  
Zhou Li, Mao Jun-jie, Chai Shun-lian. A method based on 3-D ray tracing for propagation prediction in microcellular environment [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(3): 434 – 436. (in Chinese)

- [20] Seidl S Y, Rappaort T S. Site-specific propagation prediction for wireless in-building per-sonal communication system design [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1994, 43(4): 879 – 891.

#### 作者简介



霍羽女, 1983年12月出生, 山西人. 中国矿业大学在读博士, 主要从事井下电波传播和天线理论方面的研究.

E-mail: huoyupaper@yahoo.cn



徐钊男, 1955年1月出生, 江苏人. 中国矿业大学教授, 博士生导师, 长期致力于井下通信与信息系统方面的研究与实践.