

# 地铁隧道场景中时延估计的改进算法

王利森, 李莉\*, 吴静芳, 魏爽, 周小平

(上海师范大学信息与机电工程学院, 上海 200234)

**摘要:** 基于地铁隧道场景, 利用射线跟踪法, 将多径效应产生的时延估计问题转化为在立体空间中求解不同路径之间的时间差问题。不同于发射端与接收端相对静止的情况, 考虑列车在高速运行时具有的多普勒效应, 提出了在接收与发射端运动状态下的时延估计改进方法。仿真结果表明: 相较于在收发端相对静止状态下估计得到的时延参数, 改进方法的结果与实际场景更加匹配。

**关键词:** 地铁隧道场景; 毫米波传输; 时延扩散

**中图分类号:** TN 929.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5137(2019)01-0007-06

## Improved algorithm for time delay estimation in subway tunnel scenario

WANG Lisen, LI Li\*, WU Jingfang, WEI Shuang, ZHOU Xiaoping

(College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract:** Based on the subway tunnel scenario, the time delay estimation problem generated by the multipath effect was transformed into the problem of solving the time difference among different paths in the three-dimensional space by the ray tracing method. An improved estimation method was proposed under the motion scenario considering the Doppler effect when the train running at high speed, which was different from the case of the relative static of the transmitter and receiver. The simulation results showed that the improved method was better matched with the actual scene than the method estimated in the relative static state of the receiver.

**Key words:** subway tunnel scenario; millimeter wave transmission; time delay spread

## 0 引言

室内场景无线通信电磁波传播的理论方法通常分为波模式理论法、有限时域差分法和射线跟踪法等。根据波模式理论, 电磁波只能匹配标准圆形横截面隧道的边界。有限时域差分法受到计算机运算容量的限制, 只适用于体积较小的电磁空间和相对较低的工作频率。射线跟踪法是计算高频电磁波传播的

收稿日期: 2018-10-09

基金项目: 上海市自然科学基金(16ZR1424500)

作者简介: 王利森(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事无线通信方面研究。E-mail: wanglisensen@126.com

\* 通信作者: 李莉(1962—), 女, 教授, 主要从事自适应信号处理与无线通信方面的研究。E-mail: lilyxuan@shun.edu.cn

引用格式: 王利森, 李莉, 吴静芳, 等. 地铁隧道场景中时延估计的改进算法 [J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2019, 48(1): 7-12.

Citation format: WANG L S, LI L, WU J F, et al. Improved algorithm for time delay estimation in subway tunnel scenario [J]. Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences), 2019, 48(1): 7-12.

一种普遍方法,不受场景轮廓的影响<sup>[1]</sup>.

平均时延和均方根时延是室内场景应用中的重要参数,针对不同的毫米波波段和不同的室内实验场景,国内外研究人员已经开展了一定量的信道探究工作.

DAVIES等<sup>[2]</sup>通过实验发现对于1.7 Hz的载频,通信实验室、教学实验室和走廊这3种无线传播环境都具有不足50 ns的均方根时延扩展,而60 GHz毫米波在这3种环境中传播时均产生低于40 ns的均方根时延扩展. CAI等<sup>[3]</sup>利用矢量网络分析仪(VNA)开展了基于扫频法的毫米波室内信道测量工作,发现归一化的1 m参考距离处的接收功率在-82 dB~-70 dB范围内波动;对于各室内传播环境,实测路损因子均低于0.5. 研究还表明:均方根时延扩展的取值会随着墙面反射系数的提高而增大. GENG等<sup>[4]</sup>采用与文献[3]相同的信道测量方案,分析了频率对归一化接收功率均方根时延扩展的影响. MANABE等<sup>[5]</sup>研究了接收天线的辐射方向图和极化方式对60 GHz室内无线毫米波信道的多径传播特性的影响,实验表明:高增益的接收天线可有效降低无线信道的均方根时延扩展,若用圆极化的接收天线替代线极化的接收天线,可进一步降低均方根时延扩展.

上述文献所列工作均仅对发射机与接收机相对静止的室内场景中的高频无线通信传播特性进行了研究,本文作者针对地铁通信的需求,使用射线跟踪法进行隧道场景信道建模,对地铁通信场景中毫米波传输特性参数(平均时延和均方根时延)进行估计,为动态地估计通信时延提供参考.

## 1 系统模型

与室外场景不同,电磁波在隧道场景中传播时,受隧道墙壁介质的限制,电磁波传播过程中的反射、散射情况更频繁,多径传播效应更加突出,图1给出了地铁在隧道中运行时进行无线通信的电波传播信道模型.

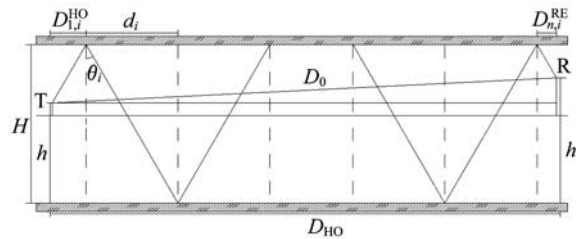


图1 隧道系统模型

图1中阴影部分为隧道的顶和地面, $H$ 为隧道的高度, $h$ 为发射天线高度, $h_1$ 为接收天线高度,且 $h_1$ 大于 $h$ . 图1中所示为第 $i$ 条路径的射线, $\theta_i$ 为该路径的反射角, $d_i$ 为该路径的两次反射法线之间的距离, $D_{H0}$ 为发射端T与接收端R之间的水平距离, $D_{1,i}^{HO}$ 为该路径发射天线端与第1次反射点之间的水平距离, $D_{n,i}^{RE}$ 为该路径第 $n$ 次反射点与接收天线的水平距离, $D_0$ 为直达波的路径长.

### 1.1 相对静止状态下多径时延估计方法

不失一般地,设全向发射天线的第 $i$ 条射线为向上发射. 由图1可知,

$$D_{H0} = \sqrt{D_0^2 - (h_1 - h)^2}. \quad (1)$$

考虑到隧道多径传输中第 $i$ 条路径的路径长取决于该路径的反射角 $\theta_i$ 及反射次数 $N$ ,在 $N$ 固定的条件下,可通过已知的 $D_{H0}$ 求得反射角 $\theta_i$ .

当 $N$ 为偶数时,

$$D_{\text{HO}} = D_{1,i}^{\text{HO}} + D_{n,i}^{\text{RE}} + (N/2)d_i, \quad (2)$$

$$D_{n,i}^{\text{RE}} = (h_1 - h) \tan \theta_i. \quad (3)$$

当  $N$  为奇数时,

$$D_{\text{HO}} = D_{1,i}^{\text{HO}} + D_{n,i}^{\text{RE}} + [(N-1)/2]d_i, \quad (4)$$

$$D_{n,i}^{\text{RE}} = (H - h_1) \tan \theta_i. \quad (5)$$

式(2),(4)中,

$$D_{1,i}^{\text{HO}} = (H - h) \tan \theta_i, \quad (6)$$

$$d_i = H \tan \theta_i. \quad (7)$$

当  $N$  为偶数时,

$$\theta_i = \arctan \{ \{ h_1 - 2h + [(N+1)/2]H \} / D_{\text{HO}} \}. \quad (8)$$

当  $N$  为奇数时,

$$\theta_i = \arctan \{ \{ -h_1 - h + [(N-1)/2 + 1]H \} / D_{\text{HO}} \}. \quad (9)$$

第  $i$  条反射路径的长度

$$D_i = D_{\text{HO}} / \sin \theta_i. \quad (10)$$

第  $i$  条路径与直达路径的时间差

$$\tau_i = (D_0 - D_i) / c, \quad (11)$$

其中,  $c$  是光速. 因此, 在收发端相对静止的情况下, 图 1 所示的系统模型中, 接收天线处的总接收信号<sup>[6]</sup>

$$s(t) = P_t \sum_{i=1}^M \beta_i \delta(t - \tau_i) e^{j\omega t}, i \in 1, 2, \dots, M_2, \quad (12)$$

其中,  $P_t$  为发射端的发射功率,  $M$  为多径数,  $\beta_i$  为第  $i$  条路径的射线功率衰减系数,  $t$  为信号传输的时间,  $\tau_i$  为第  $i$  条路径的传播时延.

设所有路径射线功率衰减系数的总和为  $B$ , 则

$$B = \sum_{i=1}^M \beta_i, \quad (13)$$

且隧道场景多径传播平均时延  $\bar{\tau}$ 、均方根时延  $\sigma$  分别表示为<sup>[7]</sup>:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^M \tau_i \beta_i, \quad (14)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^M (\tau_i - \bar{\tau})^2 \beta_i^2}. \quad (15)$$

第  $i$  条射线功率衰减系数<sup>[8]</sup>

$$\beta_i = |R_i^N \exp(j\varphi_i) / D_i|^2, \quad (16)$$

其中,  $N$  为该条路径的反射次数,  $\varphi_i$  为第  $i$  条路径和直达路径之间的相位差<sup>[9]</sup>,  $R_i$  为第  $i$  条路径的发射系数<sup>[10]</sup>,

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda}(D_i - D_0) = \frac{2\pi f}{v_\lambda}(D_i - D_0), \quad (17)$$

$$R_i = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon - (\sin \theta_i)^2}}{\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon - (\sin \theta_i)^2}}, \quad (18)$$

其中,  $\lambda$  为电磁波的波长,  $f$  为信号的频率,  $v_\lambda$  为波速,  $\epsilon$  为隧道内壁的介电常数.

在已知第  $i$  条路径的反射角  $\theta_i$  和其总长度  $D_i$  的情况下, 求得  $\beta_i, B, R_i$  和  $\varphi_i$ , 再根据式(14)和(15)估计出在收发端相对静止的状态下的平均时延和均方根时延.

### 1.2 运动状态下时延估计方法的改进

地铁场景中, 当地铁以速度  $v$  行驶时, 由于存在多普勒效应和电波多径传播路程差, 相位和频率产生变化, 从而对时延扩散产生影响.

运动状态下, 式(12)可改写为:

$$s(t) = P_t \sum_{i=1}^M \beta_i \exp\left\{j\left[\omega_0 t + \varphi_0 - \frac{2\pi}{\lambda} vt \cos(\pi/2 - \theta_i) + \varphi_i\right]\right\} = E(t) e^{j\omega t}, \quad (19)$$

其中,

$$E(t) = P_t \sum_{i=1}^M \beta_i \exp\left\{j\left[-\frac{2\pi}{\lambda} vt \cos(\pi/2 - \theta_i) + \varphi_i\right]\right\}. \quad (20)$$

平均时延和均方根时延可分别表示为<sup>[6]</sup>:

$$\bar{\tau} = \int_0^\infty t E(t) dt, \quad (21)$$

$$\sigma = \int_0^\infty t^2 E(t) dt - \bar{\tau}^2. \quad (22)$$

## 2 仿真结果

仿真场景选用上海地铁7号线的岚皋路站至新村路站的隧道区段, 隧道高7.2 m, 宽12.0 m, 发射端天线高6.0 m, 接收端天线高6.5 m, 隧道内壁介电常数为15<sup>[8]</sup>, 列车运行时速最高可达80 km·h<sup>-1</sup>, 平均时速为75 km·h<sup>-1</sup>, 在本研究中近似设置为20 m·s<sup>-1</sup>, 最大反射次数设为12次, 天线发射功率采用的是长期演进(LTE)基站的室内基带处理单元(BBU)和射频拉远单元(RRU)协同工作的额定工作功率.

按照1.1节的方法估计, 在收发端相对静止的情况下, 估计得到平均时延和均方根时延, 结果如图2,3所示.

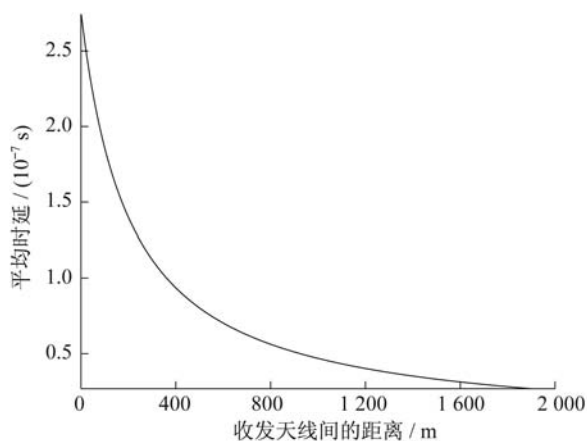


图2 相对静止状态下, 平均时延随收发天线距离变化的情况

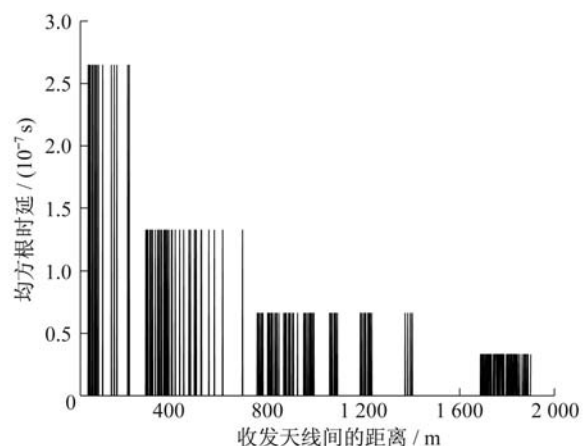


图3 相对静止状态下, 均方根时延随收发天线距离变化的情况

从图2,3可以看出,在相对静止状态下,无论是平均时延还是均方根时延,均随着收发端之间的距离变远而变小,这是由于随着收发端间的距离增加,不同反射次数路径与直达路径之间的路径差所占的比重会减少,在接发端相对运动的情况下,估计得到平均时延和均方根时延,结果如图4,5所示.

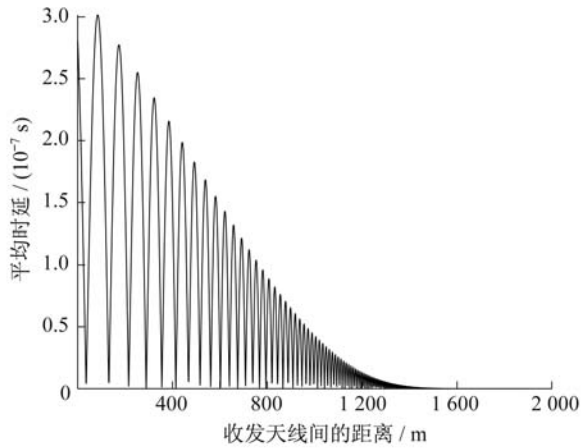


图4 运动状态下,平均时延随收发天线距离变化的情况

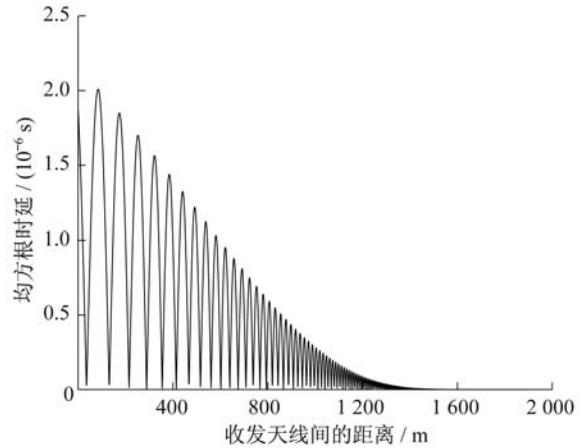


图5 运动状态下,均方根时延随收发天线距离变化的情况

图4,5中,从总的距离区间上来看,在收发端高速运动状态下,平均时延和均方根时延随着距离的增加而呈减小的趋势.在收发天线距离为0~1400 m的区间内,平均时延从 $3 \times 10^{-7}$  s开始减少,均方根时延从 $2.5 \times 10^{-6}$  s开始减少;大于1400 m时,两者近乎为0.根据波模理论,隧道环境下,在离收发天线较近的区域,存在多种模式的电波,随着传输距离的增大,大量高阶的传播模式迅速消失,最后近似只有一束波存在.

从每一小段距离来看,时延参数存在周期性变化.排除多径效应,单考虑多普勒效应,在频率连续的情况下,时延对时域的影响也是周期性的,说明多径效应和多普勒效应都会直接或者间接地产生时延,因此,图4,5中的平均时延和均方根时延分别大于图2,3中的相应值,更符合实际场景中的时延参数特性.

### 3 结 论

基于地铁隧道的场景,使用射线跟踪法进行信道建模,求得任意一条反射路径的长度,得出相对于直达路径的时间差、相位差.在收发端相对静止的情况下,估计出平均时延和均方根时延.在此基础上,考虑地铁高速运行而产生的多普勒频移,得到了收发端处于运动状态下的平均时延和均方根时延.仿真实验结果表明:所讨论的平均时延估计改进方法更符合实际场景中时延的情况.本研究是在最大反射次数和多径数目都确定的条件下进行的,如何估计合理的多径数目和最大反射次数是未来要进一步研究的问题.另外,本研究建立的信道模型仅适用于近似于直线型的隧道区段,对于存在弯道或者高度差的隧道,有待进一步探索.

## 参考文献:

- [ 1 ] ZHANG L, BRISO C, FERNANDEZ J R O, et al. Delay spread and electromagnetic reverberation in subway tunnels and stations [J]. *Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15(4): 585 – 588.
- [ 2 ] DAVIES R, BENSEBTI M, BEACH M A, et al. Wireless propagation measurements in indoor multipath environments at 1.7 GHz and 60 GHz for small cell systems [C]// *Vehicular Technology Conference*. St. Louis: IEEE, 2013: 583 – 589.
- [ 3 ] CAI X, YIN X, CHENG X, et al. An empirical random-cluster model for subway channels based on passive measurements in UMTS [J]. *Transactions on Communications*, 2016, 64(8): 3563 – 3575.
- [ 4 ] GENG S, KIVINEN J, ZHAO X, et al. Millimeter-wave propagation channel characterization for short-range wireless communications [J]. *Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 58(1): 3 – 13.
- [ 5 ] MANABE T, MIURA Y, IHARA T. Effects of antenna directivity and polarization on indoor multipath propagation characteristics at 60 GHz [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 14(3): 441 – 448.
- [ 6 ] LEE W C Y. *Theory and application of mobile communication engineering* [M]. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [ 7 ] 由明昕. 基于射线跟踪法的隧道无线信道特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.  
YOU M X. Research on radio tracking based tunnel wireless channel characteristics [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [ 8 ] 贾明华. 地铁隧道环境毫米波传播特性的研究 [D]. 上海: 上海大学, 2010.  
JIA M H. Study on millimeter wave propagation characteristics in metro tunnel environment [D]. Shanghai: Shanghai University, 2010.
- [ 9 ] 叶娇, 覃添翼, 李亚斌. 高速移动下轨道交通无线通信系统的多普勒效应 [J]. *城市轨道交通研究*, 2013(2): 34 – 37.  
YE J, TAN T Y, LI Y B. Doppler effect of radio communication system for rail transit under high speed mobile [J]. *Urban Mass Transit*, 2013(2): 34 – 37.
- [ 10 ] 戚星宇. 复杂隧道环境毫米波传播特性仿真与实测 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.  
QI X Y. Simulation and measurement of millimeter wave propagation characteristics in complex tunnel environment [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017.

(责任编辑: 包震宇, 顾浩然)