

# 城市轨道交通隧道场景基于射线追踪技术的 LTE-M 系统性能仿真方法研究

唐 霁

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉 // 高级工程师)

**摘 要** 城市轨道交通特殊场景下对 LTE-M (城市轨道交通车地综合通信系统) 系统性能进行准确评估是一个非常复杂的问题。提出了基于射线追踪技术的 LTE-M 系统性能仿真方法。该方法无需进行信道测量, 通过海量计算即可得到无线信道特性参量, 进而进行性能仿真, 特别适合城市轨道交通等缺少标准信道模型的场景。

**关键词** 城市轨道交通; 隧道; 城市轨道交通车地综合通信系统; 射线追踪技术; 无线信道

**中图分类号** U231.7

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.01.010

## LTE-M System Performance Emulation Approach Based on Ray-tracing Technology in Urban Rail Transit Tunnel Scenario

TANG Pei

**Abstract** It is complicated to evaluate the performance of LTE-M system accurately in the particular scenario of urban rail transit. An LTE-M system performance emulation approach based on ray-tracing technology is proposed. The approach can obtain the channel characteristic parameters by massive computing without channel measurement to conduct the system simulation, which is particularly suitable for scenarios lack of standard channel models such as urban rail transit.

**Key words** urban rail transit; tunnel; LTE-M; ray-tracing technology; wireless channel

**Author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

LTE-M(城市轨道交通车地综合通信系统)是基于公网 LTE(长期演进)技术专门为城市轨道交通定制的宽带移动通信系统, 实现了对基于通信的列车控制(CBTC)、集群调度和乘客信息系统(PIS)等多种业务的综合承载, 目前已广泛应用于北京、重庆、深圳、上海等近 80 条城市轨道交通线路<sup>[1-2]</sup>。LTE-M 系统性能仿真是开展关键技术和网络优化部署等研究的重要手段。当前性能仿真均基于标准

信道模型, 然而 LTE-M 作为专网, 其电波传播环境、工作频段、网络部署方式等都与 LTE 公网有着显著的不同, 因此难以沿用 LTE 公网的信道模型。

目前, 学术界和工业界已经针对轨道交通特殊场景无线信道特性分析与建模开展了一定的研究, 并针对部分场景建立了标准信道模型。例如, 针对隧道漏缆场景, 3GPP(第三代合作伙伴计划)建立了单径莱斯信道模型和多径信道模型。然而上述标准信道模型, 为了降低复杂度、提高普适性, 进行了大量的简化。例如, 没有考虑隧道截面、漏缆位置、漏缆挂高等因素, 因此难以对具体工程环境的无线信道特性进行精确刻画, 进而对 LTE-M 系统性能进行准确评估。

针对上述问题, 本文提出了基于射线追踪技术的 LTE-M 系统性能仿真方法:

- 1) 针对轨道交通工程环境, 建立电波传播场景 3D 模型;
- 2) 基于场景 3D 模型, 采用射线追踪技术, 仿真得到无线信道特性参量;
- 3) 根据得到的无线信道特性参量, 得到时变信道冲激响应, 进行无线信道仿真;
- 4) 在搭建的性能仿真平台对 LTE-M 系统性能进行仿真测试。

本文提出的方法与传统基于信道模型的性能仿真评估方法相比, 具有以下三方面主要优点:

- 1) 不依赖于信道模型, 适用场景更广;
- 2) 针对具体工程环境, 针对性更好;
- 3) 场景参数(如隧道截面、漏缆位置、漏缆挂高、漏缆辐射特性、车载天线等)均可灵活调整。

本文采用该方法, 以国内某市域铁路区间直线隧道漏缆场景为例, 分析了无线信道特性, 并在搭建的 LTE-M 仿真系统上对 LTE-M 系统性能进行了仿真, 探究了影响机理。

## 1 电波传播场景 3D 建模

建立电波传播场景的高精度 3D 模型(包括环境中反散射体的物理位置、几何尺寸和材质),是开展射线追踪的基础,直接关系到射线追踪对信道特性刻画精度。但在实际研究中,为了降低场景建模和射线追踪的复杂度,提升研究结果的普适性,通常需要对场景进行较大的简化,即只考虑对信道特性

有较大影响的场景特征,而忽略较多的细节,同时也会造成仿真精度一定程度的下降。

本文以郑州机场至许昌市域铁路区间矩形隧道直线地段为例(如图 1 所示),重点考虑隧道和列车车体,将隧道近似为如图 2 所示的矩形模型,隧道材质设定为混凝土;将列车近似为如图 3 所示的车辆模型(参考 B 型车),车辆材质设定为铝合金型材;对于接触网、受电弓、电缆支架、水管等细节未加考虑。

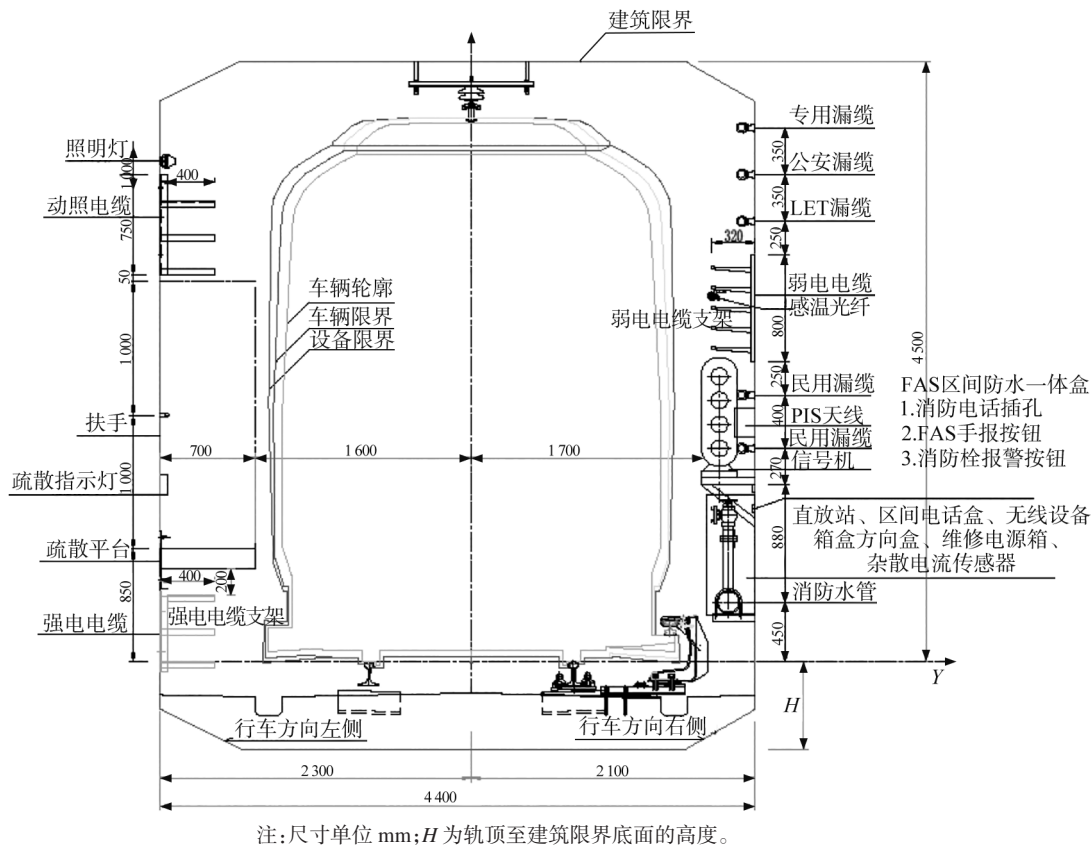


图 1 郑州机场至许昌市域铁路区间矩形隧道直线地段建筑限界图

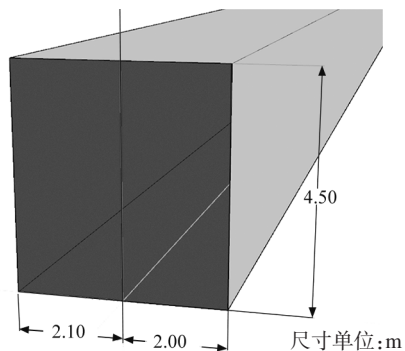


图 2 隧道 3D 模型

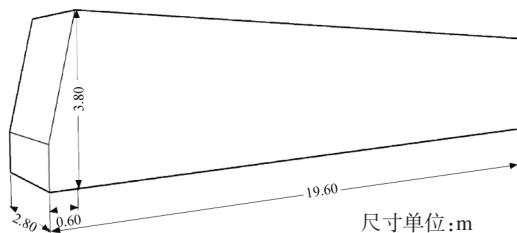


图 3 列车 3D 模型

射线追踪技术基于一致性绕射理论(UTD),将高频电磁波(如微波、毫米波等)在远场的传播特性简化为射线模型,根据电波传播场景的 3D 模型,通过追踪每根射线的传播过程(包括反射<sup>[3]</sup>、绕射<sup>[4]</sup>和散射等),得到每根射线的无线信道特性参量(包

## 2 基于射线追踪的无线信道特性分析

### 2.1 射线追踪技术

括路径损耗、时延、相移、频移、离开角、到达角等),最后综合得到整个信道的特性参量。

射线追踪技术基于场景模型和海量计算,可以无需进行现场信道测量,具有实施成本低、周期短、灵活性好等优点,近年来得到了越来越广泛的研究和应用。如文献[5]采用射线追踪技术对芬兰赫尔辛基城区环境多径传播特性进行了研究;文献[6]将射线追踪技术得到的信道特性与基于实测的信道数据进行了对比,显示具有很好的一致性。

北京交通大学和德国布伦瑞克工业大学联合开发了射线追踪平台。为了验证平台仿真得到的信道特性的准确性,研发人员在多种场景下,对该平台射线追踪得到信道特性结果与现场的实测数据进行对比,并通过了中国计量科学研究院的检测。例如,文献[7]采用该平台研究了列车车厢场景无线信道特性,并与实地测量结果进行了对比,结果表明,该平台具有较高的精度。该平台于2016年投入试运行,2018年7月在英国伦敦正式向全球发布,目前已有美国、德国、瑞典等国的20多个科研机构使用该平台进行无线信道研究。

## 2.2 无线信道特性分析

基于建立的隧道和列车3D模型,在射线追踪平台上,可得到不同漏缆挂高时的无线信道特性,其相关参数设置如表1所示。

表1 射线追踪参数设置

参数名称	参数值或相关描述
频段/MHz	1 785 ~ 1 795
带宽/MHz	10
频率采样间隔/MHz	0.1
反射阶数/阶	8
射线模式	直射、反射、散射
漏缆开槽	均匀开缝,缝隙间隔 0.15 m
漏缆位置	隧道侧壁
漏缆挂高/m	3.4, 3.8, 4.0(相对于轨面)
车载天线类型	全向天线
车载天线位置	列车顶部中心线位置,相对于轨面高度 3.85 m

基于射线追踪技术,可以得到距离车载天线最近的201个缝隙(从信号馈入漏缆的方向,缝隙索引号依次为-100~+100)的信道数据,包括第*i*个缝隙辐射的第*j*条射线的信道增益 $\alpha_{i,j}$ 、时延 $\tau_{i,j}$ 、离开角、到达角等。根据上述信道数据,计算得到各缝隙到车载天线无线信道的信道特征参量,包括路径损耗、平均时延、均方根时延扩展等,如图4所示。

由图4可综合得到整个无线信道的特征参数,如表2所示。在以此基础上可进一步开展信道建模

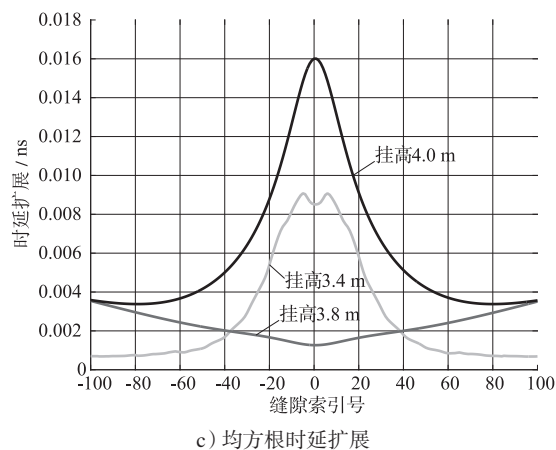
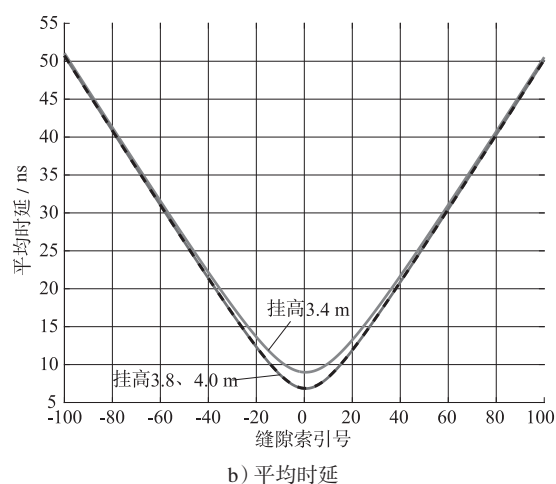
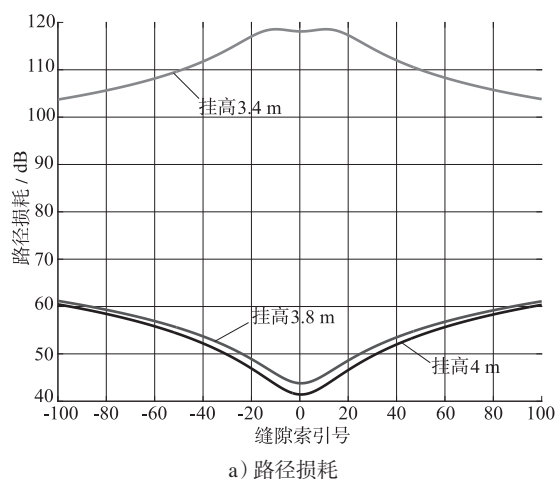


图4 各缝隙辐射信道的信道特征参数和信道仿真。

表2 综合得到的无线信道特征参数

漏缆挂高/m	路径损耗/dB	平均时延/ns	时延扩展/ns
3.4	96.75	38.54	9.79
3.8	32.28	12.82	8.65
4.0	37.78	13.18	10.73

由图4和表2可知,漏缆挂高对信道特性有显

著的影响。漏缆挂高为 3.4 m 时,相对于挂高为 3.8 m 和 4.0 m 的路径损耗和平均时延都明显增加(如路径损耗增加约 60 dB)。这是因为车载天线高度 3.85 m、车体高度为 3.8 m,当漏缆挂高为 3.4 m 时直射射线被车体遮挡,只能通过隧道壁和车体的反射到达车载天线;而漏缆挂高为 3.8 m 和 4.0 m 时,射线主要以直射方式到达车载天线,因此路径损耗和平均时延要小得多。

文献[8]对 2.145 GHz 频段隧道漏缆场景的无线信道进行了实地测量,测量时漏缆与车载天线存在直射径。文献[8]给出了实测数据的均方根时延扩展累计概率函数,中值约为 12.1 ns(即累积分布函数为 0.5 时的取值)。而本文中,当漏缆挂高为 4.0 m 时,均方根时延扩展约为 10.73 ns,与文献[8]的实地测量结果有差异但基本吻合。差异产生原因,一方面是由于场景与参数设置存在差异;另一方面,为了降低复杂度,在射线追踪仿真时,对场景进行了简化,没有考虑部分反散射体,从而会导致均方根时延扩展有一定程度的下降。

### 3 无线信道仿真方法

现介绍基于射线追踪技术得到的无线信道参量、生成时变信道冲激响应,以及进行无线信道仿真的方法。具体流程如下:

1) 计算多普勒频移:多普勒频移是无线信道的重要参数,直接关系到信道的时变特性。由于隧道漏缆场景中只有车载天线处于移动中,因此多普勒频移只与射线到达角中的俯仰角  $\theta_{i,j}$  和水平角  $\omega_{i,j}$  有关,可得

$$f_{i,j} = f_c \frac{v}{c} \cos \theta_{i,j} \cos \omega_{i,j}$$

其中,  $f_c$  为载波频率,  $v$  为列车移动速度,  $c$  为光速。这里假定多普勒频移不随时间发生变化。

2) 得到时变信道系数:根据各射线的多普勒频移  $f_{i,j}$  和复信道增益  $\alpha_{i,j}$ , 得到各射线的时变信道系数为

$$\alpha_{i,j}(t) = \alpha_{i,j} \exp(j2\pi f_{i,j} t)$$

3) 得到时变信道冲激响应:将具有相同时延的射线的信道系数相加,得到时变信道冲激响应

$$h(t, \tau) = \sum \alpha_{i,j}(t) \delta(\tau - n\tau_s), n = 0, 1, 2, \dots$$

其中,  $\tau_s$  为接收机时延分辨率,  $\delta(\tau - n\tau_s)$  为冲激函数。

4) 得到信道输出  $y(t)$ , 完成信道仿真:

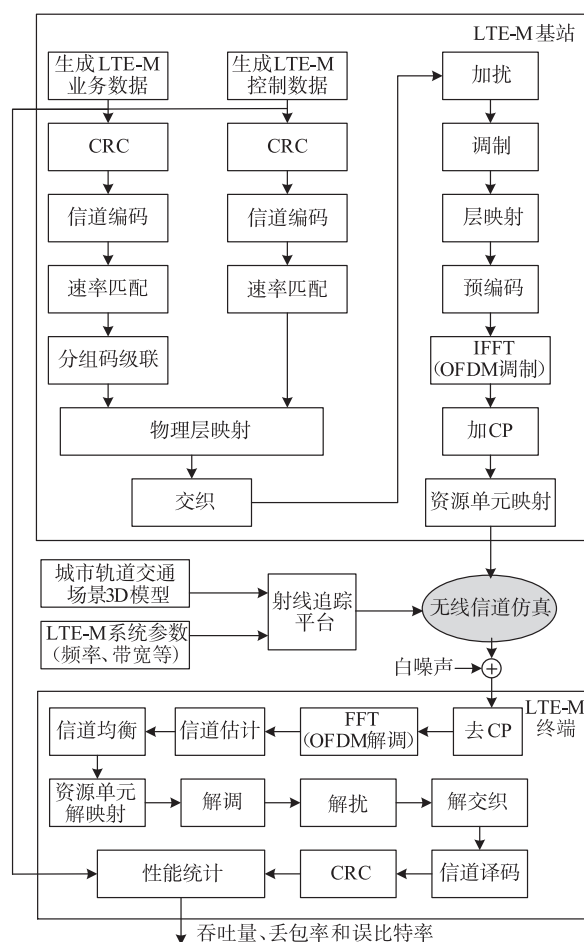
$$y(t) = x(t) \otimes h(t, \tau)$$

其中,  $x(t)$  为发射信号,  $\otimes$  表示卷积运算。

## 4 LTE-M 系统性能仿真

### 4.1 LTE-M 系统性能仿真

本文基于 Matlab 软件的仿真工具,按照 3GPP 规范,搭建了 LTE-M 系统仿真。该仿真可以灵活设置频段、带宽、上下行时隙配比、特殊子帧等参数,能支持多种场景无线信道和多种信道仿真方法(包括基于标准信道模型和基于射线追踪),能实现对吞吐量、丢包率、误比特率等性能指标的仿真。仿真流程如图 5 所示。



注: CRC 为循环冗余校验; IFFT 为逆快速傅里叶变换; OFDM 为正交频分复用; CP 为循环前缀; FFT 为快速傅里叶变换。

图 5 LTE-M 系统仿真流程图

### 4.2 性能仿真结果

现针对郑州机场至许昌市域铁路区间矩形隧道场景,参照 LTE-M 系统参数配置,采用上述射线追踪技术得到无线信道和信道仿真方法,在 LTE-M



系统仿真中对下行性能进行了仿真评估, 仿真参数如表 3 所示。

表 3 仿真参数表

参数名称	参数值或有关描述
频段/MHz	1 785 ~ 1 795
带宽/MHz	10
上下行子帧配比	1:1
特殊子帧	模式 4
CP	普通 (4.7 $\mu$ s)
信噪比/dB	0 ~ 20
移动速度/(km/h)	40 ~ 160
无线信道	基于射线追踪的矩形隧道场景信道
仿真帧数/帧	10 000
信号采样速率/(样本个数/s)	$15.36 \times 10^6$

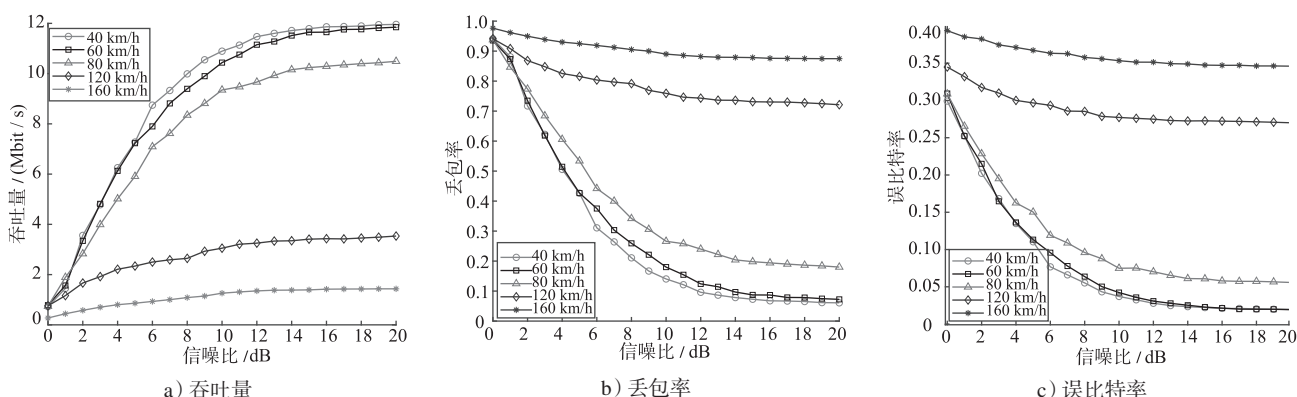


图 6 性能仿真结果图

## 5 结语

本文以隧道漏缆场景为例, 介绍了所提出的基于射线追踪的 LTE-M 系统性能评估方法。该方法具有适用面广、精度较高、灵活性好等优点, 能为 LTE-M 工程建设和设备设计与优化提供支持。

## 参考文献

- [1] 朱东飞, 洪婷. 城市轨道交通车地通信综合承载系统 (LTE-M) 性能测试与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017(5): 171.
- [2] 宋鸿昇, 张晴, 杨世华, 等. LTE-M 在城市轨道交通车地无线通信中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016(增刊 2): 71.
- [3] KALLIOLA K, LAITINEN H, VAINIKAINEN P, et al. 3-D double-directional radio channel characterization for urban macrocellular applications [J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 2003(11): 3122.
- [4] EL-SALLABI H M, REKANOS I T, VAINIKAINEN P. A new heuristic diffraction coefficient for lossy dielectric wedges at

本案例在不同信噪比和移动速度下对 LTE-M 系统性能进行了仿真测试。由图 6 可见: 随着信噪比增大, LTE-M 系统吞吐量增加, 丢包率和误比特率下降, 系统性能不断提高; 但当信噪比达到 15 dB 后, 性能提升不明显。因此, 建议将信噪比优化目标设定为 15 dB。另外, 随着速度增加, 吞吐量下降, 误比特率和丢包率上升, 特别是当移动速度超过 80 km/h 后, 性能会发生明显恶化。此时多普勒频偏和扩展是影响性能的主要因素, 在接收机研发时必须考虑采用性能更优的多普勒频偏和扩展校正算法。

normal incidence[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2002(1): 165.

- [5] FUSCHINI F, EL-SALLABI H, DEGLI-ESPOSTI V, et al. Analysis of multipath propagation in urban environment through multidimensional measurements and advanced ray tracing simulation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008(3): 848.
- [6] ERRICOLO D, CROVELLA U G, USLENGHI P L E. Time-domain analysis of measurements on scaled urban models with comparisons to ray-tracing propagation simulation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002(5): 736.
- [7] GUAN K, PENG B, HE D, et al. Channel characterization for intra-wagon communication at 60 and 300 GHz bands[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019(6): 5193.
- [8] PAULI A, RALF C, PERTTI V. Wideband radio channel measurements for train tunnels[C]//IEEE. Preceeding of the 48th IEEE vehicular technology conference. Ottawa, Ont., Canada: IEEE, 1998.

(收稿日期: 2019-03-14)