

# 基于裂缝波导的车地无线通信系统 性能指标测试分析\*

赵朝娜<sup>1,2</sup> 郑国莘<sup>1</sup> 徐靖<sup>2</sup> 尹柯伟<sup>2</sup>

(1. 上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海先进通信与数据科学研究院, 200072, 上海; 2. 中电科微波通信(上海)股份有限公司, 201802, 上海//第一作者, 工程师)

**摘要** 车地无线通信基于 LTE(长期演进)技术的无线传输媒介主要是泄漏电缆、自由天线及裂缝波导。裂缝波导是一种抗干扰性更强、信号覆盖均匀的无线传输介质。采用 HFSS 软件仿真裂缝波导的耦合强度等参数,并利用近场测试系统测试裂缝波导的耦合强度,从而得到波导接收天线最佳接收高度。通过裂缝波导、波导接收天线、LTE 基站和车载终端测试车地通信系统的吞吐量、丢包和延时等性能指标,验证了基于裂缝波导的车地通信系统在 CBTC(基于通信的列车控制)中的适用性。

**关键词** 轨道交通; 裂缝波导; LTE 技术; 车地通信

**中图分类号** TN928;U285.21<sup>+</sup>1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.01.010

## Test and Analysis of the Performance Indicators for Train/Ground Wireless Communication System Based on Leaky Waveguide

ZHAO Chaona, ZHENG Guoxin, XU Jing, YIN Ke-wei

**Abstract** The wireless transmission media of train/ground wireless communication combined with LTE (long term evolution) technology is mainly the leaky cable, free antenna and leaky waveguide. The last one is a wireless transmission medium featuring stronger anti-interference and uniform signal coverage. In this paper, the coupling strength of leaky waveguide is simulated by HFSS software, the coupling strength parameters are measured by the near field testing system, the optimum antenna reception height is finally obtained. Parameters like the throughput, packet loss and delay of the train/ground communication system are measured by building a test network with the leaky waveguide, the receiving antenna, the LTE base station and vehicle-mounted facilities. It is concluded that the leaky waveguide used in train/ground wireless communication system is feasible in CBTC application.

**Key words** rail transit; leaky waveguide; LTE technology; train/ground wireless communication

**First-author's address** Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, 200072, Shanghai, China

WLAN(无线局域网)技术,在过去几年内已被广泛应用于轨道交通 CBTC(基于通信的列车控制)车地通信系统<sup>[1]</sup>。LTE(长期演进)技术具有高带宽、高移动性、长区间覆盖、高扩展性等特点,可解决既有无线系统存在的不稳定、移动性差等问题,近些年被广泛应用于轨道交通车地通信系统<sup>[2-3]</sup>。根据工业及信息化部 2015 年 65 号文件,轨道交通行业可供划分使用的 LTE 频段为 1.785 ~ 1.805 GHz。故 LTE 易与同样获准采用 1.8 GHz 频段的专用网络产生异网同频干扰。而且地铁 1.8 GHz 专用频段紧邻中国移动 DCS1800 系统的下行频段及中国电信系统的上行频段,还会产生邻频干扰。因此对传输媒介需认真选择。

车地无线通信系统采用的传输媒介主要有泄漏电缆、自由天线和裂缝波导三种。自由无线系统易受干扰,同时信号存在近大远小,系统稳定性差和可靠性差等问题。泄漏电缆和裂缝波导的特性比较类似,二者的信号场强都是比较均匀。但泄漏电缆的接收天线一般安装于列车侧面或者车顶,在高架和地面区段时,不仅更易受到外界干扰,还会辐射一定的信号对其他系统造成干扰。裂缝波导的波导接收天线一般安装于车底,因此,其信号稳定性

\* 国家自然科学基金面上项目(61571282)

和抗干扰性更好。

裂缝波导能提供稳定连续的通信<sup>[4-7]</sup>,被广泛应用于无线环境中复杂的场景。文献[4]给出了用于 CBTC 的裂缝波导的功能和布置原则,以及裂缝波导衰耗的计算方法。文献[5]介绍了将裂缝波导结合 802.11 g 协议应用于 CBTC 的车地通信系统,并建立了无线电隧道通信模型,模拟裂缝波导在隧道内的辐射特性,给出了结合 AP(Wireless Access Point)的射频性能以及解决方案。文献[5]没有说明波导在整个列车地面通信系统中的应用。文献[6]给出在 CBTC 系统的相关波导性能测试内容,介绍了测试方法的详细信息,根据裂缝波导原理设计了一种简单的、基于裂缝波导的列车地面通信系统,并给出了当系统中使用 802.11 g 时,AP(无线接入点)与 AP 基站之间的裂缝波导覆盖距离应小于 500 m 的结论。文献[7]给出了裂缝波导信道和自由空间瑞利信道的性能差异对比,证实了裂缝波导可提供大容量、更稳定和高可信度的车地通信。

本文通过研究裂缝波导在波导接收天线不同高度的场强分布能力,得到波导接收天线的安装的最佳高度位置参数。在此基础上,搭建 LTE 车地无线网络测试环境,模拟传输 CBTC 数据业务,验证其在覆盖、通信吞吐量、延时和丢包的能力,得出了基于裂缝波导的车地通信系统在 CBTC 应用可行的结论,并分析了实际应用中,裂缝波导存在热胀冷缩的特性,给出裂缝波导每隔 300 m 连接一段跳线的安装方式,并给出了系统链路损耗的计算方法。

### 1 裂缝波导介绍

矩形波导是用于传输微波信号的一种传输线。当微波在波导中传输时,波导里电磁场的分布比较复杂,但是有特定的规律。可在波导中独立存在的每一种电磁波分布称为“模”。图 1 为矩形波导中最常见的 TE<sub>10</sub>模的场结构的立体图。对于一定尺寸的波导,每一个模都有其对应的截止频率 $f_c$ 。当电

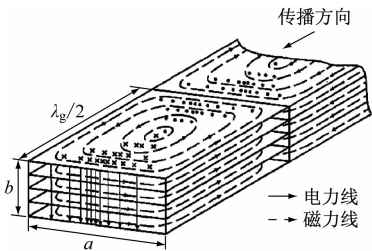


图 1 TE<sub>10</sub>模的电磁场立体结构

磁波的频率低于 $f_c$ 时,就不能在波导中传输,处于截止状态。只有电磁波的工作频率高于截止频率,电磁波才能在传输波导中传输。所以金属波导具有“高通滤波器”性质<sup>[8]</sup>。

裂缝波导是在矩形波导宽面上周期性开缝(见图 2)。裂缝波导的材料为金属(一般为铝合金),而且波导内有 TE<sub>10</sub>的电磁波存在;因此,在裂缝波导的内壁上存在电流。缝隙的存在截断了波导内壁表面电流线。一部分电流会绕过该缝隙,剩下的则通过位移电流的方式沿原来方向通过缝隙,使缝隙间产生变化的电磁场,从而产生电磁波<sup>[9]</sup>。裂缝波导的缝隙都很小,泄漏出来的能量也就十分小,故传输损耗较小,适用于地铁沿线应用。

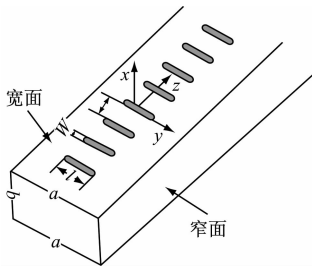


图 2 裂缝波导示意图

本文研究的裂缝波导选取国家标准型号为 BJ22 型的波导管,频率为 1.72 ~ 2.61 GHz,且宽边和窄边比为 2:1,标准型 BJ22 裂缝波导参数见表 1。

表 1 标准型号 BJ22 裂缝波导参数表 mm

参数	取值
波导横截面宽边 $a$	109.22
波导横截面窄边 $b$	54.31
缝隙长度	21.00
缝隙宽度	5.00
缝隙间隔	60.00

裂缝波导为了适应轨道交通的应用场景,一般有 1 m、3 m、6 m、9 m 和 11 m 等长度规格。裂缝波导和裂缝波导之间采用中间密封法兰进行连接,直至所需传输距离(见图 3)。裂缝波导在需要连接基站的一端连接波导同轴转换,裂缝波导的另一端一般连接波导负载或者泄露负载。

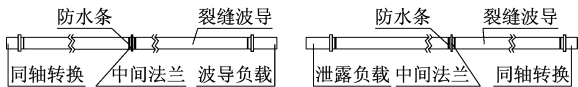


图 3 地面敷设裂缝波导的架构示意图

### 2 裂缝波导仿真和测试

裂缝波导采用的是近场耦合的方式。目前裂

缝波导的近场并没有准确的信道模型。裂缝波导与波导接收天线最佳位置关系,通常采用软件仿真和实际测试的方式获得。

2.1 软件仿真裂缝波导耦合强度

基于 LTE 技术的裂缝波导型车地通信系统的工作频段是 1.785 ~ 1.805 GHz,因此本文重点关注此频段的天线耦合性能。

采用 HFSS 软件建立裂缝波导模型和波导接收天线模型波导管选用 BJ22 型号,长度设置为 3 m,波导接收天线采用金属腔的结构方式,经过尺寸优化使其性能达到最佳。将波导接收天线放置在裂缝波导正上方进行仿真。将天线高度  $h$  分别设置为 200 mm,315 mm 和 418 mm,采样间隔为 30 mm,仿真频率选为中心频率 1.795 GHz。创建的仿真模型见图 4,插入损耗和耦合强度仿真结果见图 5 ~ 6。根据仿真结果,裂缝波导的插入损耗为  $-0.046\text{ dB}/(3\text{ m})$ ,即  $1.53\text{ dB}/(100\text{ m})$ 。耦合强度的仿真结果见表 2。由表 2 可知,裂缝波导和波导接收天线之间的间距越小,耦合强度越好。

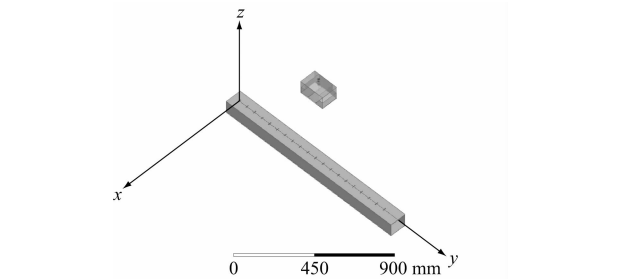


图 4 裂缝波导仿真模型

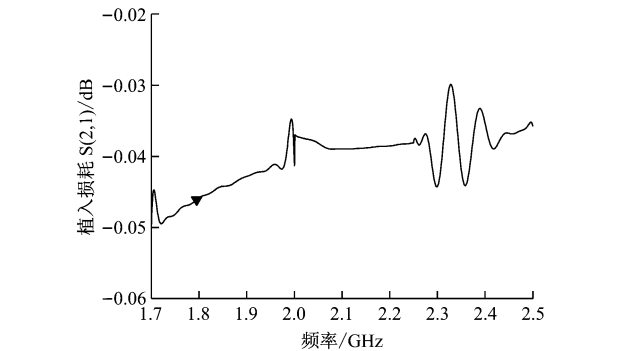


图 5 裂缝波导插入损耗仿真结果

表 2 仿真耦合强度结果

天线高度/mm	耦合强度平均值/dB	
	50% 耦合	95% 耦合
200	-59.516	-60.121
315	-60.933	-61.777
418	-64.081	-65.327

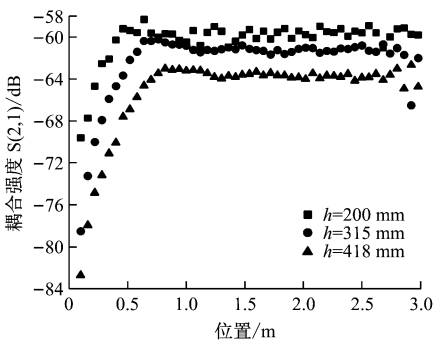


图 6 不同高度耦合强度仿真结果

2.2 实体试验

在微波实验室使用矢量网络分析仪和二维近场平面测试系统进行试验。在实际应用中列车的振动会导致波导接收天线左右的偏移,因此,不仅要验证波导接收天线在裂缝波导正上方的耦合情况,还需验证天线左右偏移后波导的耦合强度性能。

试验设备布置示意图见图 7。试验测试了天线在不同  $h$  及不同的左右偏移  $L$  情况下的耦合场强。试验采用 6 m 裂缝波导管及对应的波导接收天线测试,采样间隔为 30 mm,测试频率为 1.795 GHz, $h$  分别为 200 mm、315 mm、365 mm、418 mm 和 480 mm, $L$  分别为 0(正对)、10 cm、20 cm 和 30 cm。将裂缝波导放置在近场测试支架上,将波导接收天线在裂缝波导上方匀速移动,按采样间隔记录测试数据。表 3 为测试结果,图 8 ~ 12 分别为不同高度的测试结果分布图。

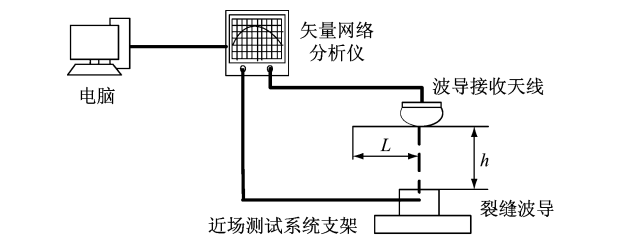


图 7 裂缝波导测试架构图

从表 3 可知,随着  $h$  增加,耦合场强是逐渐变小的,正对状态下, $h > 400\text{ mm}$  时的 95% 耦合场强比  $h = 200\text{ mm}$  时的小约 3 dB,比  $h = 315\text{ mm}$  和 365 mm 时小约 2 dB。可见,波导接收天线和裂缝波导之间的间距越小越好。从图 8 ~ 12 可知,考虑耦合场强, $h$  越小,则  $L$  越小。在  $h = 200\text{ mm}$  时,位置偏移会导致无线信号波动较大,即无线信号分布很不均匀。基于测试结果,波导接收天线距离裂缝波导的最佳距离可选 315 ~ 365 mm。

表 3 波导接收天线不同高度和偏移位置的信号场强

$h/\text{mm}$	$L/\text{cm}$	50% 耦合时的场强/ $\text{dB}$	95% 耦合时的场强/ $\text{dB}$
200	0	-58.737	-60.190
315	0	-60.210	-61.345
365	0	-61.144	-62.459
418	0	-62.154	-64.325
480	0	-62.304	-63.421
200	10	-60.988	-65.010
315	10	-61.715	-62.979
365	10	-62.137	-63.436
418	10	-61.980	-64.001
480	10	-63.457	-64.609
200	20	-65.773	-72.591
315	20	-64.435	-65.635
365	20	-64.419	-67.157
418	20	-64.880	-66.085
480	20	-64.067	-66.897
200	30	-70.397	-78.669
315	30	-67.424	-70.134
365	30	-66.684	-70.176
418	30	-73.024	-78.020
480	30	-66.180	-69.543

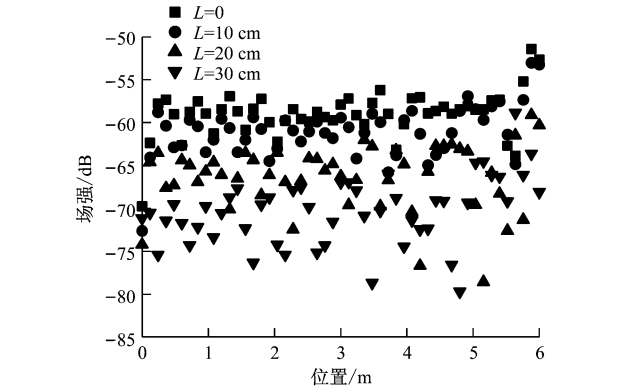


图 8  $h = 200\text{ mm}$ 、不同  $L$  时的场强情况

### 2.3 测试数据分析

根据软件仿真和现场试验结果,波导接收天线在裂缝波导正上方的高度越低,耦合场强越好;天线偏移中心越大,耦合场强越差;偏移时的耦合场强与天线高度有关系,高度低,天线左右偏移的耦合场强分布不均匀,当偏移一定量时,位置低波导接收天线的耦合强度反而不如位置高的耦合强度高。 $315 \sim 365\text{ mm}$  是比较好的天线高度。

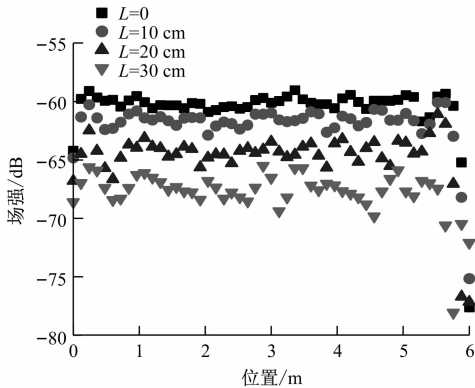


图 9  $h = 315\text{ mm}$ 、不同  $L$  时的场强情况

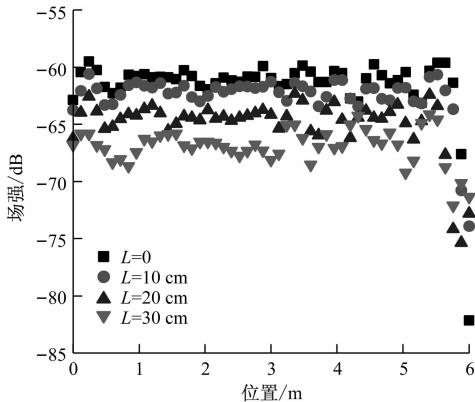


图 10  $h = 365\text{ mm}$ 、不同  $L$  时的场强情况

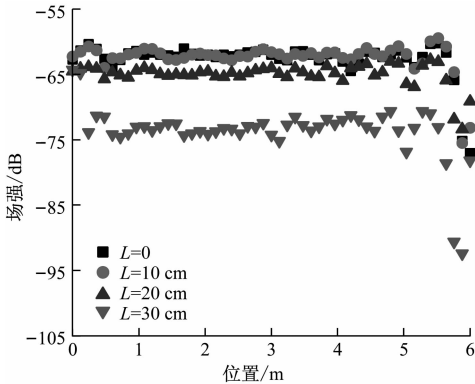


图 11  $h = 418\text{ mm}$ 、不同  $L$  时的场强情况

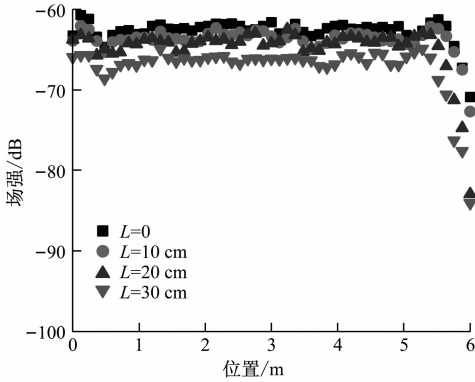


图 12  $h = 480\text{ mm}$ 、不同  $L$  时的场强情况

3 裂缝波导结合 LTE 技术的适用性分析

为进一步验证裂缝波导作为 LTE 技术的车地通信系统的传输介质的适用性,要测试 LTE 技术和裂缝波导的匹配性。轨道交通 CBTC 业务要求如表 4 所示<sup>[12]</sup>。系统测试模拟传输 CBTC 数据业务,测试裂缝波导技术覆盖、通信吞吐量、延时和丢包的能力。

表 4 轨道交通 CBTC 车地通信业务的要求				
列车业务	数据速率/ (Mbit/s)	时延/ms	切换时延/ ms	可靠性要求
CBTC	0.2	150	150	高

搭建 LTE 车地无线网络测试环境见图 13。采用 4 根 11 m 的裂缝波导、1 台基带处理单元(BBU) 2 台 RRU(射频拉远单元)。RRU 连接可调衰减器后,分别连接左右两侧各 22 m 的裂缝波导。可调衰减器用于模拟 LTE 信号衰落特性。测试模型分为近、中和远点,远点对应的信号强度为[ - 85, - 95) dBm,中点为[ - 75, - 85) dBm,近点为 - 75 dBm 以下。小车上放置了波导接收天线、TAU(跟踪区更新)和车载服务器。天线放置高度为 350mm。地面 RRU 通过光纤连接到 BBU。而 BBU 通过网线连接至 EPC 核心网和地面服务器。服务器通过 IXchariot 软件模拟 CBTC 业务。测试中的 LTE 配置见表 5。

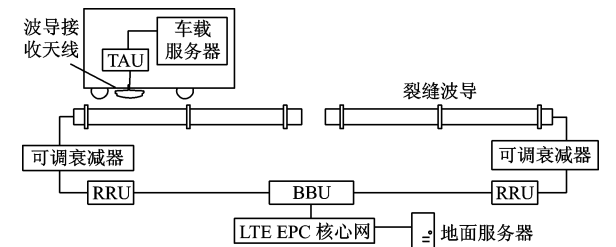


图 13 车地通信测试框图

表 5 测试中的 LTE 配置

项目	配置内容
LTE 频率	1.8 GHz
小区频点	配置相同频点 65 300
LTE 系统频宽	10 MHz
邻区配置	LTE:相邻小区的两个 RRU 配置为同一频点, RRU 连接在一个 BBU 上
配比	上下行配比 2:2,特殊子帧 10:2:2
测试点	远、中、近点

裂缝波导的插入损耗仿真值为 1.53 dB/(100 m)。但实际使用中,100 m 长的裂缝波导是一根根连接起来的,故实际损耗会比仿真值大一些。按照 3 dB/(100 m),进行模拟测试。在没加衰减器时,裂缝波导(5 m 位置)正上方的测试信号强度为 - 57 dBm,根据该值模拟裂缝波导传输 500 ~ 1 400 m。主要测试项目为:

- (1) 承载 CBTC 业务的传输时延应小于 150 ms。
- (2) 无损和无缝切换延时性能测试中,延时单向 < 150 ms,丢包率 ≤ 0.5% 。
- (3) LTE 吞吐量测试,吞吐量 ≥ 0.2 Mbit/s。测试结果如表 6 ~ 7 所示。

表 6 传输时延和吞吐量测试结果				
场强值/ dBm	单侧模拟 距离/m	测试项目		
		最大传输 延时/ms	下行吞吐量/ (Mbit/s)	上行吞吐量/ (Mbit/s)
- 72	500	21	18.976	7.860
- 75	600	21	18.942	7.860
- 78	700	21	18.868	7.856
- 81	800	21	18.338	7.857
- 85	930	22	17.339	7.858
- 90	1 100	23	18.342	7.857
- 95	1 260	23	18.867	7.855

表 7 切换时延和丢包率测试结果					
状态	切换次数/ 次	成功次数/ 次	平均时延/ ms	最大时延/ ms	丢包率/ %
无缝切换	30	30	16	23	0.001
无损切换	30	30	17	23	0.012

由测试结果分析,单侧传输模拟距离可达 1 260 m(双侧可达 2 500 m)。而实际工程中,因裂缝波导的热胀冷缩特性,长距离裂缝波导需要断开,并连接 1 段跳线(如图 14 所示),以平衡热胀冷缩的压力。一般 1 段裂缝波导连的连续长度为 300 m<sup>[11]</sup>。在实际工程中,每 300 m 波导的总损耗 = 裂缝波导传输损耗 + 同轴转换 + 射频跳线的损耗,则系统链路计算方法为:

$$P_r = P_t - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5 \quad (1)$$

式中:

$P_r$ ——接收信号强度;

$P_t$ ——发射信号强度;

$L_1$ ——连接裂缝波导射频电缆损耗;

$L_2$ ——裂缝波导耦合损耗;

$L_3$ ——裂缝波导传输损耗;

$L_4$ ——300 m 跳接损耗,为跳线损耗和 2 个同轴转换损耗(0.2 dB)之和;

$L_5$ ——车载射频馈线传输损耗。

例如,若采用射频跳线的损耗为 1 dB,则每隔 300 m 多出 1.4 dB 的损耗;根据上述已知 0 m 位置信号接收信号强度为 -57 dBm,传输损耗 3 dB/(100 m),末端信号为 -95 dBm,式(1)可算出,单侧最大传输距离为 1 127 m。

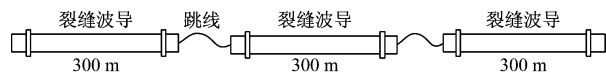


图 14 裂缝波导工程安装示意图

参考某品牌泄漏电缆的损耗情况,其在 1.8 GHz 的损耗为 4.1 dB/100 m,接收天线高度为 2 m 时,50% 耦合场强损耗的测试结果为 61 dB,95% 为 66 dB<sup>[12]</sup>。经比较,泄漏电缆 50% 的耦合场强损耗与裂缝波导基本一致,95% 的耦合场强损耗比裂缝波导大约 3~4 dB。可见,裂缝波导的信号均匀性优于泄漏电缆。

## 4 结 语

本文提出了裂缝波导作为 CBTC 系统车地无线通信的传输媒介,通过仿真和实际测试得出裂缝波导最佳耦合高度,并搭载 LTE 基站配套裂缝波导进行了通信模拟测试,从而得出裂缝波导应用于 CBTC 系统车地无线传输的可行性结论,并为实际工程实施,提供了裂缝波导和波导接收天线之间的位置关系的理论基础。

考虑裂缝波导热胀冷缩的特性,给出长距离裂缝波导敷设时,系统链路损耗的计算方法,进一步保证了裂缝波导型车地通信系统应用于工程的可能。

裂缝波导不仅可以应用于基于 WLAN 技术的车地无线通信系统,并且可以扩展应用于基于 LTE 技术的车地通信系统,可以更加充分发挥 LTE 技术的优势。

## 参考文献

- [1] ZHU L, YU F R, NING B, et al. Service availability analysis in communication-based train control (CBTC) systems using WLANs[C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa: ON, 2012:1383.
- [2] NGUYEN K, BEUGIN J, BERBINEAU M, et al. Modelling Communication Based Train Control System for Dependability Analysis of the LTE Communication Network in Train Control Application[C]//2014 European Modelling Symposium. Pisa: 2014: 320.
- [3] TENG Changmin, WANG Li, SI Chaogang. Design and performance tests in different test scenarios based on the TD-LTE train-ground communication system[C]//2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), Chengdu: IEEE, 2016: 1575.
- [4] 蒋先进,邢艳阳,肖培龙. 北京市轨道交通首都国际机场线 CBTC 信号系统采用的波导管布置原则[J]. 铁路通信信号工程技术,2007(4):53.
- [5] HEDDEBAUT M. Leaky Waveguide for Train-to-Wayside Communication-Based Train Control[J]. IEEE transactions on vehicular technology (Trans. Veh. Technol.), 2009(58): 1068.
- [6] ZHU L, WANG H W, NING B. An experimental study of rectangular leaky waveguide in CBTC[J]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2009: 951.
- [7] 王洪伟,蒋海林. 漏泄波导在城市轨道交通 CBTC 车地通信系统中的应用研究[J]. 铁道学报,2013,35(2):44.
- [8] 陈乃云,魏东北,李一玫. 电磁场与电磁波理论基础[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.
- [9] 王洪伟. CBTC 车地通信信道建模及系统优化[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [10] TANG T, DAI Keping, ZHANG Yanbing, et al. Field test results analysis in urban rail transit train ground communication systems of integrated service using LTE-M[C]//2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rio de Janeiro: ICIT. New York: IEEE, 2016: 2017.
- [11] 徐朝勇,安彤. 轨道交通通信网用裂缝波导结构设计方案[J]. 城市轨道交通研究,2016(11):114.
- [12] 颜如月. LTE-M 无线电波覆盖及切换性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.

(收稿日期:2018-03-05)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704