

高速磁浮交通毫米波通信系统场强测试分析*

胡昌桂¹ 张仿琪² 陈笑南³ 魏祥斌¹ 董丹阳⁴ 虞 翊²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海;

3. 上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 200041, 上海;

4. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海 // 第一作者, 正高级工程师)

摘 要 为了研究高速磁浮交通毫米波通信系统的信号传输性能, 在同济大学嘉定校区 1.5 km 磁浮试验线上全面测试了试验线沿线基站的场强覆盖, 计算了试验线各基站的路径损耗。通过对测试结果进行分析, 得到了磁浮典型场景下毫米波信道的特性数据, 并以此预测了不同基站、不同功率、不同距离下的信号场强覆盖指标。

关键词 高速磁浮; 毫米波通信系统; 信道特性; 场强测试
中图分类号 U237.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.005

Measurement and Analysis of Field Strength of High-Speed Maglev Millimeter Wave Communication System

HU Changgui, ZHANG Fangqi, CHEN Xiaonan, WEI Xiangbin, DONG Danyang, YU Yi

Abstract To investigate the signal transmission characteristics of high-speed maglev MMW communication system, full-aspect on-site testing of the intensity coverage of base stations is carried out on the 1.5 km high-speed Maglev test line in Jiading campus of Tongji University, and path losses of each base station are calculated. By analyzing testing results, the typical millimeter wave channel characteristics in maglev scenarios are obtained, and signal coverages of different base stations, different power or at different distances are predicted.

Key words high-speed maglev; MMW communication system; channel characteristics; field strength testing

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

近期, 国家磁浮交通工程技术研究中心在同济大学嘉定校区高速磁浮试验线(以下简称“试验线”)上试验了速度为 600 km/h 的高速磁浮试验样车。试验样车采用的车地通信系统与文献[1]中提

及的相同。该车地通信系统采用 38 GHz 频段承载车地间的列车定位数据、运行控制数据及乘客信息服务。通信系统关乎磁浮交通的安全运行^[2-3]。因此, 为了确保通信的可靠性, 需要对车地间无线信道的特点进行研究。

文献[4]在室内走廊环境下, 对使用的定向天线 28 GHz 频段信道进行了测量, 利用射线跟踪技术分析了 28 GHz 频段的路径损耗和小尺度衰落特性。文献[5-7]在室内环境下对 60 GHz 信道的路径损耗和时间色散性进行了深入研究, 结果表明, 视距(LOS)下路径损耗指数的变化范围为 0.40~2.10, 非视距(NLOS)环境下路径损耗指数的变化范围为 1.97~5.40, 两者存在显著差异。文献[8-9]在室外环境下对 28 GHz、38 GHz、73 GHz 频段的传播信道进行了测量与建模, 研究发现, LOS 与非视距环境下毫米波的传播距离分别约为 200 m 和 100 m; 且在高铁场景信道研究方面, 非平稳信道、视距稀疏信道和视距多输入多输出(MIMO)受到广泛关注。文献[10-11]预测了毫米波在铁路通信的应用模式。文献[12]对铁路环境中 40 GHz 频段毫米波的传播特性进行了测试, 重点研究了高架线路中的传播损耗。

为了确保高速磁浮交通典型场景下毫米波通信的可靠性, 本文通过测试、计算和仿真等方法, 对试验线 38 GHz 频段信道的传输特性进行了研究。

1 高速磁浮交通毫米波通信系统场强测试

1.1 高速磁浮交通车地无线通信系统场强测试平台介绍

高速磁浮交通车地无线通信系统场强测试平台由场强仪与电脑组成。场强仪安装于三脚架接收平台上, 从水平和垂直两个方向可对接收角度进

* 同济大学“十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200602-02); 中国工程院院地合作项目(2018-GD-3)

行调节。频谱仪通过信号电缆与场强仪信号输出端口相连。数据处理计算机与频谱仪采用以太网连接,由便携式计算机对频谱仪测量数据进行存储、处理及显示。

场强仪中的变频模块将测量信号的频率线性降频至易于观测的低频段,且将其输入到频谱仪进行观测。混频器和滤波器是变频模块的主要部件,其工作原理如图 1 所示。本振信号(LO)倍频后输入到混频器与射频信号(RF)混频,输出频率为和频与差频,经滤波器滤去和频信号后,即得到频率被降低的差频信号(IF)。

图 1 中,本振采用 4.71 GHz 信号源。将本振信号经过变频后得到的 37.68 GHz 信号作为测量系统的基准信号。以 38 GHz 测量信号为例,经过变频器后输出的信号为 320 MHz。

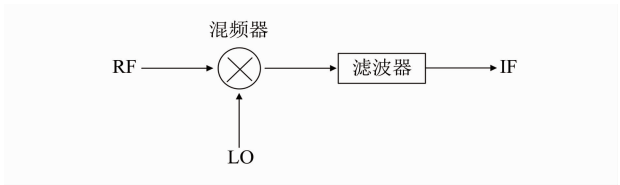


图 1 场强测试平台变频模块工作原理图

同理,对无线电频率分别为 37 GHz、38 GHz 和 39 GHz 的信号进行测量,则经场强仪输出对应的差频信号值均小于 6 GHz,可由频谱仪进一步处理。

1.2 试验线地面基站概况

试验线地面基站位置示意图,如图 2 所示。试验线全长 1 500 m,其中,车库长度为 93 m。为了使磁浮列车运行过程中始终有两个环路与列车保持有通信链路,根据运行控制系统双分区设置的要求,试验线进行了重叠布站。

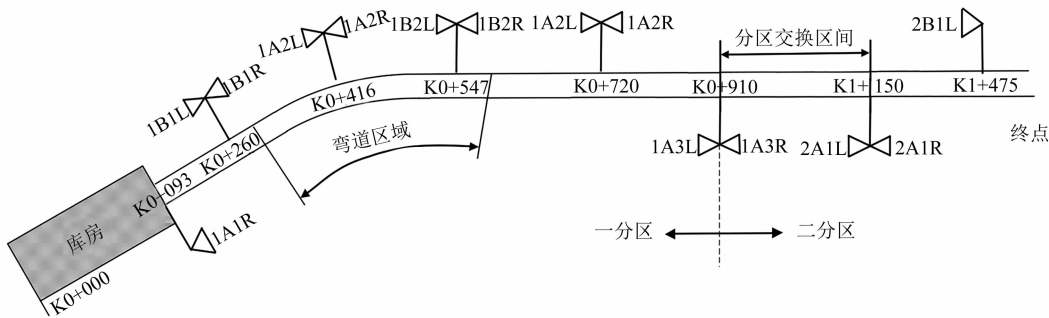


图 2 试验线地面基站位置示意图

图 2 中,试验线的双环覆盖是指磁浮列车与两个环路进行通信,以保证列车的安全运行。在一分区内,1A1、1A2、1A3 为一个通信环路,此环路的地面基站频率为 37 128 MHz;1B1、1B2、1B3 为另一个通信环路,此环路的地面基站频率为 3 338 MHz。在二分区内,2A1 为一个环路,此环路地面基站频率为 3 352 MHz;2B1 为另一个环路,此环路的地面基站频率为 37 563 MHz。不同环路的地面基站设置不同的频率,不仅可以避免信号间的干扰,也可以更好地保证双环覆盖的效果。

将试验线各基站的命名规则和相关信息统计在表 1 中。表 1 中,每个基站编号前的 1 和 2 分别表示基站所处的分区,1 表示基站布置在一分区,2 表示基站布置在二分区;每个基站编号后的 L 和 R 分别表示每个基站朝左的天线和朝右的天线。

由图 2 可知,试验线由直道区域与弯道区域组

表 1 试验线各基站的命名规则和相关信息统计表

分区	基站	中心频率/MHz	基站所在位置里程
一分区	1A1R	37 128	K0+093
	1B1L	37 338	K0+260
	1B1R	37 338	K0+260
	1A2L	37 128	K0+416
	1A2R	37 128	K0+416
	1B2L	37 338	K0+547
	1B2R	37 338	K0+547
	1A3L	37 128	K0+720
	1A3R	37 128	K0+720
	1B3L	37 338	K0+910
二分区	1B3R	37 338	K0+910
	2A1L	37 352	K1+150
	2A1R	37 352	K1+150
	2B1L	37 563	K1+475

成,其中,K0+300—K0+600 为弯道区域,其他区域为直道区域。为了使地面基站能够覆盖足够大的区域,在直道区域地面基站选择了波束宽度较窄但增益较高的天线,而在弯道区域地面基站选择了波

束宽度较宽但增益较低的天线。弯道区域的地面基站包括 1A2 与 1B2,其他地面基站都处于直道区域。弯道区域和直道区域地面基站天线的参数如表 2 所示。

轨道类型	波瓣宽度/(°)		天线增益/dBi	天线接收灵敏度/dB
	水平	垂直		
直道区域	10	5	25	-85
弯道区域	20	5	20	-85

试验线地面基站实际安装位置如图 3 所示。图 3 中,安装基站天线的抱杆距试验线轨道中心线的距离为 2 m,基站的高度距轨道平面的距离为 3.05 m。



图3 试验线地面基站的实际安装位置图

2 试验线基站场强的冗余覆盖

将试验线地面各基站天线设置为背对背模式,基站垂直下方“灯下黑”,导致场强覆盖存在盲区,其解决方案是依靠相邻基站的信号保证应有的场强覆盖。通过现场对试验线全线基站的场强分布进行测试来验证该方案的可行性。

以 1B1 基站为例,其无线信号将保证对相邻基站下方覆盖。通过现场测试,获得场强覆盖情况,如图 4 所示。由图 4 可知,基站两个方向的信号接收功率均随着离基站距离的增大而减小,沿线场强总体控制在-55 dBm 以上。其信号接收功率在邻近基站 1A1R 和 1A2 盲区处均大于-60 dBm,实现

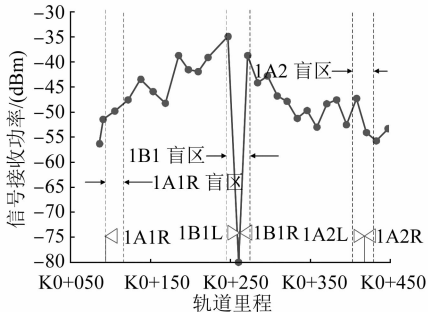


图4 基站 1B1 的场强分布图

了对邻近基站盲区的覆盖。基站盲区出现在 K260 处,盲区长度约为 30 m,且盲区将由基站 1A1R 和 1A2L 保障覆盖。

基站 1A1R 处的场强覆盖情况,如图 5 所示。由图 5 可知,基站处信号接收功率在-50 dBm 之上;在基站 1B1 盲区附近的信号接收功率约为-45 dBm,该值大于地面基站接收信号阈值-85 dBm,满足了基站覆盖要求。

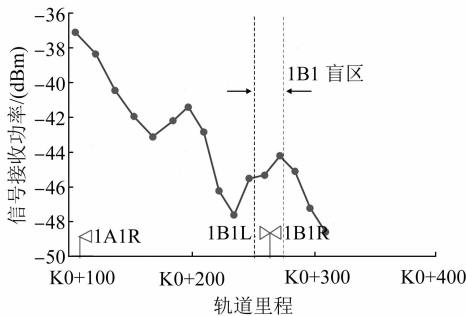


图5 基站 1A1R 的场强分布图

基站 1A2 处的场强覆盖情况,如图 6 所示。由图 6 可知,基站两个方向的信号接收功率都随着离基站距离的增大而减小;基站沿线总体场强控制在-60 dBm 以上;基站盲区出现在 K0+416 处,盲区长度约为 22 m,其信号接收功率在邻近基站 1B1 和 1B2 盲区处都大于-60 dBm,实现了对邻近基站盲区的覆盖。

由此可见,试验线沿线的信号接收功率高于-60 dBm,各基站实现了对相连基站盲区的覆盖,从而使得试验线全线没有信号接收盲区。另一方面,由于实际运行的磁浮列车头车与尾车的总长度约为 54 m,因此,磁浮列车的头车和尾车不会同时出现在某个基站盲区内。综上所述,试验线的基站场强分布可以满足实际高速磁浮列车的通信需求。

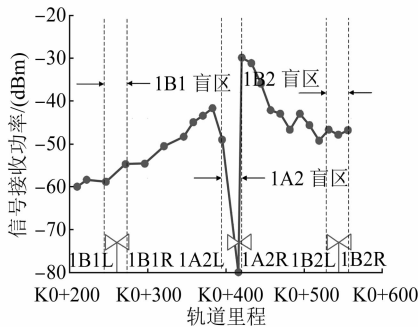


图6 基站 1A2 场强分布图

3 毫米波路径损耗的预测

实测系统中,路径损耗 P_L 的计算公式为:

$$P_L = P_t - P_r + G_t + G_r - L_s \tag{1}$$

式中:

P_t, P_r ——分别为信号的发射功率与接收功率;

G_t, G_r ——分别为基站天线的增益与测试使用喇叭天线的增益;

L_s ——场强仪与低频线 L3 的总损耗,通过系统标定为 28.80 dB。

由式(1)计算出试验线各基站的路径损耗值后,通过线性拟合得到各基站的路径损耗,见图 7。

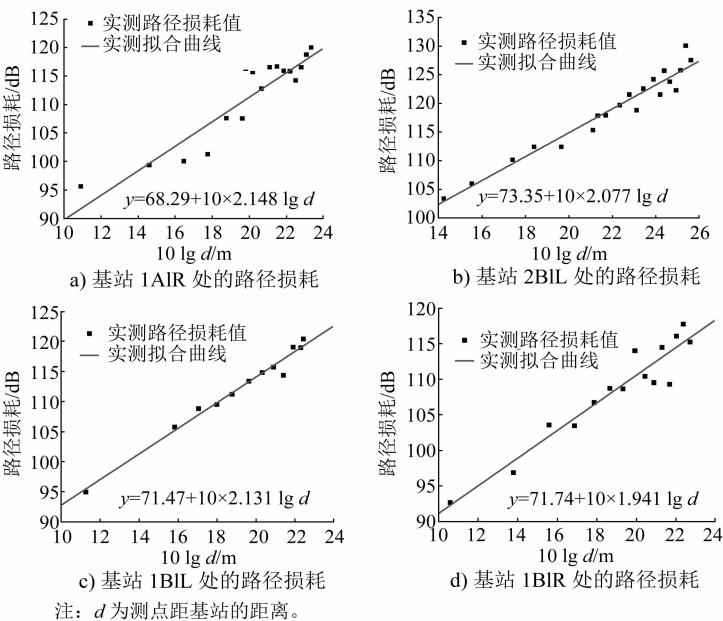


图 7 试验线沿线各基站处路径损耗拟合曲线

图 7 中,试验线沿线各基站的路径损耗拟合直线对应的参数 如表 3 所示。由表 3 可知,试验线沿线各基站处的实测路径损耗拟合直线的路径损耗指数 β 的取值范围为 1.9~2.1,路径损耗截距 α 为 66.56~74.10 dB。自由空间的路径损耗指数一般取 2, β 与自由空间的路径损耗指数存在差距,一方面是由于实际测试环境下信号在传播过程中由于受

到周围障碍物反射而降低了传播时的衰减;另一方面是由于测试中基站天线增益可能存在损耗,导致接收功率变小。根据上述分析, α 取 70.33 dB, β 取 2。

进一步在相同的天线配置与场景下,预测基站远距离毫米波覆盖下接收机接收到的信号功率,如表 4 所示。由表 4 可知,若将 -85 dBm 作为最低接收功率,则表 4 中仅存在 1 项低于接收功率指标,说明基站间距离可望进一步增加,以减少投资和维护成本。

基站天线	路径损耗参数		
	α /dB	β	σ
1A1R	68.29	2.148	2.82
1B1L	71.47	2.131	1.67
1B1R	71.47	1.941	2.93
1A2L	73.20	1.943	2.86
1A2R	71.48	2.104	2.67
1B2L	70.23	2.111	1.87
1B2R	70.35	2.157	2.01
1A3L	66.56	2.165	2.65
1A3R	71.40	2.088	1.77
1B3L	68.41	2.068	2.04
1B3R	74.10	1.969	1.89
2A1L	72.61	2.010	2.32
2A1R	68.63	2.208	2.45
B1L	73.35	2.077	2.83

注: σ 为标准差。

4 结语

在同济大学嘉定校区 1.5 km 的磁浮试验线上全面测试了试验线沿线基站的场强覆盖,针对背靠背天线设置下的“灯下黑”盲区,通过相邻基站的相互冗余覆盖可以使该区域接收信号的功率大于 -65 dBm,满足通信需求。对试验线全线的测试结果表明,典型磁浮场景下毫米波车地信道的路径衰减截距为 70.33,衰减指数为 2,由此预测了不同基站功率、不同距离下的信号覆盖。该结果对超高速磁浮的毫米波通信系统基站布设具有一定的参考意义。

表 4 试验线基站不同里程与发射功率下的信号接收功率

基站信号发射功率/(dBm)	不同基站里程处的信号接收功率/(dBm)						
	K0+010	K0+020	K0+050	K0+100	K0+200	K0+500	K1+000
30	-49.13	-55.15	-63.11	-69.13	-75.15	-83.11	-89.13
36	-43.13	-49.15	-57.11	-63.13	-69.15	-77.11	-83.13
40	-39.13	-45.15	-53.11	-59.13	-65.15	-73.11	-79.13
46	-33.13	-39.15	-47.11	-53.13	-59.15	-67.11	-73.13

参考文献

[1] 周民立. 上海磁浮线车地无线通信技术特点分析[J]. 城市轨道交通研究,2010(12): 26.

[2] 张仿琪. 毫米波无线通信系统在高速磁浮交通中的应用[D]. 上海:复旦大学,2011.

[3] WU W, LU X, LIU G, et al. Operation control system of 600 km/h high-speed maglev levitated transport system in china[C] //IEEE. 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). New York: IEEE,2019: 1-5.

[4] LI S, LIU Y, ZHANG X, et al. Measurement and simulation of 28 GHz millimeter-wave propagation characteristics in the corridor environment[C] //IEEE. Millimeter Waves & Terahertz Technologies. New York: IEEE, 2017.

[5] KYRO M, HANEDA K, SIMOLA J, et al. Measurement based path loss and delay spread modeling in hospital environments at 60 GHz[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on,2011,10: 2423.

[6] ANDERSON C R, RAPPAPORT T S. In-building wideband partition loss measurements at 2.5 and 60 GHz[J]. IEEE transactions on wireless communications,2004,3: 922.

[7] YONG S, XIA P, VALDES A. 60 GHz Technology for Gbps WLAN and WPAN: From Theory to Practice[M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.

[8] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G R, SAMIMI M K, et al. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. IEEE Transactions on Communications,2015,63: 3029.

[9] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al. Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work! [J]. IEEE Access, 2013,1: 335.

[10] AI B, CHENG X, KÜRNER T, et al. Challenges toward wireless communications for high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2014,15(5): 2143.

[11] AI B, GUAN K, RUPP M, et al. Future railway services-oriented mobile communications network[J]. IEEE Communications Magazine,2015(10): 78.

[12] NAKAMURA K, YAMAGUCHI D, LWASAWA N, et al. Study of the millimeter-wave propagation characteristics in the railway environment[C] //IEEE. International Symposium on Antennas & Propagation. New York: IEEE, 2017.

(收稿日期:2020-11-27)

(上接第 18 页)

频段和 315~1 600 Hz 中频段,采用减振措施的区段线性声压级都存在明显增加,且隔振效率越高,声压级越大。

2) 在列车运行过程中,车厢不同位置处噪声声压级变化范围处于 5 dB(A) 以内,且主要频带集中在 0~200 Hz 范围内,呈低频特性,位于带司机室的拖车和受电弓处噪声最小。

3) 车速从 0 提高到 60 km/h 时,噪声声压级变化量在 14 dB(A) 以内;随着车速从 0 开始增加,噪声声压级快速增大;当车速大于 40 km/h 后,声压级逐步缓慢增长;不同车速下车内出现的噪声峰值频率不同,随着车速提高,噪声声压级峰值频率变小。

4) 基于轮轨噪声的影响,相较于直线段,曲线段车内噪声声压级增大约 1 dB(A),建议线路尽量采用较大的曲线半径。

综上所述,采用减振措施并不是隔振效率越高越好,这可能会引起较大的车内噪声变化;应该着重研究不同减振措施以及不同车速对车内噪声的影响频段,从系统的角度出发综合考量选取最为合

适的减振降噪措施。

参考文献

[1] 郝珩,耿传智,朱剑月. 不同轨道解耦减振效果测试分析[J]. 城市轨道交通研究,2008(4): 68.

[2] 耿传智,董国宪,朱剑月,等. 弹性钢轨扣件轨道的轮轨作用力分析[J]. 城市轨道交通研究,2007(4): 20.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 声学 轨道车辆内部噪声测量:GB/T 3449—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

[4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通列车噪声测量限值 and 测量方法:GB 14892—2006[S]. 北京:中国质检出版社,2006.

[5] 石晨,周劲松,谢晓波. A 型地铁车内噪声分析和优化[J]. 计算机辅助工程,2013(3): 14.

[6] 薛红艳,刘岩,张晓排,等. 地铁车辆车内噪声分布规律研究[J]. 噪声与振动控制,2016(2): 126.

[7] 于喜林,郭海洋,刘厚林,等. 城市轨道交通车辆内部噪声分析研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2009(3): 14.

[8] BSI. Railway Applications Acoustics Measurement of Noise Inside Railbound Vehicles;BS EN ISO 3381:2005[S]. Brussels: CENELEC,2005.

(收稿日期:2018-02-07)