

LTE 承载市域铁路信号系统研究

孟寒松

(深圳市铁路投资建设集团有限公司, 518066, 深圳//高级工程师)

摘要 对市域铁路信号系统无线传输性能的关键影响因子进行分析,建立了基于 GBSM(基于几何的随机模型)的无线信道仿真模型,针对关键影响因子提出相应措施对 LTE(长期演进)系统网络性能进行优化,搭建仿真测试平台。仿真测试结果验证了在市域铁路环境下 LTE 技术能够满足信号系统的传输需求。

关键词 市域铁路;信号系统;长期演进;无线通信

中图分类号 U283.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.07.023

Research on LTE Bearing Suburban Railway Signaling System

MENG Hansong

Abstract The key influencing factors that affect the wireless transmission performance of suburban railway signaling system are analyzed. A wireless channel simulation model based on GBSM (geometry-based stochastic model) is established. Corresponding measures are proposed to optimize the network performance of LTE (long-term evolution) system according to the key influencing factors, and a simulation test platform is built. The simulation test results verify that the LTE technology can meet the transmission needs of signaling system in suburban railway environment.

Key words suburban railway; signaling system; LTE; wireless communication

Author's address Shenzhen Railway Investment and Construction Group Co., Ltd., 518066, Shenzhen, China

我国的城镇化已经进入大都市区化发展阶段,除建设市内地铁、轻轨等外,还通过建设服务于城市与郊区、中心城市与卫星城、重点城镇间的市域铁路,形成一小时通勤的大都市区。这既避免了城市摊大饼式的发展,又最大限度地提高了大都市区的人口密度,发挥了大城市群的集聚经济,更好地实现经济和谐发展。

市域铁路相对地铁、轻轨等具有运行速度快、切换频繁等特点,故需要对其在 LTE(长期演进)环

境下信号系统的运行情况进行测试,分析 LTE 对信号系统性能的影响,明确在 LTE 网络下市域铁路信号系统的适应性。

本文对市域铁路环境下影响信号系统无线传输性能的关键影响因子进行分析,建立集成多种关键影响因子的无线信道仿真模型,搭建市域铁路环境下的仿真测试平台,针对各关键影响因子提出 LTE 系统优化措施,测试在不同列车运行速度下无线传输主要性能参数(时延、吞吐量及丢包率),验证市域铁路信号系统在 LTE 网络中的适配性。

1 市域铁路环境下无线传输性能关键影响因子分析

1.1 多普勒频移的影响

LTE 系统是通过多个频宽为 15 kHz 的子载波进行数据的传输,其发射端和接收端需要在对应的频率上进行调制解调无线信号。当频率发生偏移时会导致接收端无法正确解调,从而造成不同子载波之间的载波干扰及其相应码元之间的干扰。如文献[5]中描述,在 SINR(干扰信噪比)为 10 dB 时,基于传输带宽 5% 频偏相较于没有频偏情况下,接收端误码率高 25%。

列车在运行时,列车和轨旁基站进行相对运动,列车接收到的无线频率与基站发出的频率并不相同,同时基站接收到的无线频率与列车发出的频率也不相同。根据多普勒-斐索频移公式,偏移后的频率计算公式为:

$$f' = f \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{1-\beta \cos \theta} \quad (1)$$

$$\beta = v/c \quad (2)$$

式中: f' ——偏移后的频率;

f ——原频率;

v ——列车运行速度;

c ——光速;

θ ——接收器与波源的连线到速度方向的

夹角。

当列车运行速度为 250 km/h 时,多普勒理论频率偏移最大值为 416.67 Hz,子载波的频率为 15 kHz,频率偏移量占子载波传输带宽 2.78%,系统误码率将提升,从而影响传输性能。

1.2 小区切换异常的影响

每个基站覆盖一定的区域(以下简称“小区”)。列车在线路上运行时,需要在不同小区内运行,并根据接收的无线信号功率执行切换操作。

整个切换操作流程按照 3GPP(第三代合作伙伴计划)TS 24.301 中定义,从终端进行测量上报开始,到终端 RRC(无线资源控制)重配完成,期间涉及到终端、源服务小区、目的服务小区及核心网等多个网元。LTE 小区切换操作各环节耗时如表 1 所示。

表 1 LTE 小区切换操作各环节耗时		
Tab.1 Opertion time for each link of LTE cell handover		
序号	切换操作流程环节	耗时/ms
1	测量上报间隔	240
2	同频切换时间迟滞	320
3	源服务小区、目的服务小区和核心网之间切换请求	10
4	下行同步时延	1
5	终端等待发送前置码接入时隙	5
6	终端发送随机接入前置码	1
7	基站处理随机接入应答信息解码	20
8	终端重配完成信令的发送和处理	20
合计		617

当列车运行速度为 250 km/h 时,总计切换距离为 42.85 m。在小区切换过程中终端接收的无线信号功率会发生巨大变化,可能导致小区切换异常,包括过早切换(由于目标服务小区发射功率过低导致误码率提升、吞吐量下降)、过晚切换(由于源服务小区发射功率过低导致误码率提升、吞吐量下降)、乒乓切换(在源服务小区和目标服务小区之间反复切换,每次切换均带来误码率提升)或者切换失败。小区切换异常均会影响传输性能。

1.3 信道多径急剧变化的影响

无线信号在传输过程中,除在发射端和接收端之间直线传输外,还通过周围环境中物体折射、反射,使得各路径信号到达接收端的时间、相位和到达角度不同,从而造成接收信号功率的加强或者衰落。在噪声保持不变的情况下,这将导致信噪比的

上升或者降低。

LTE 系统根据信噪比对数据包进行编码后发送。在信噪比为 9.84 dB 时可选择码率为 0.455 1 的 64QAM(64 正交幅相调制)进行编码,在信噪比为 7.40 dB 时可选择码率为 0.540 0 的 16QAM 进行编码^[6]。即保持噪声不变条件下,信号接收功率降低 2.44 dBm,吞吐量降低 21%,且在低信噪比情况下采用高码率的编码方式,会提高误码率。

按照 3GPP TR 38.901 协议中的 CDL(集群延迟线)模型,在视距传输情况下,除主径外其他多径最多可占总接收功率的 11%,在非视距传输情况下,首先到达的信号功率最多仅占总接收功率的 14%。

列车运行过程中,在发射端保持发射功率不变的情况下,信号经过不同路径到达接收端,导致接收信号功率的巨大变化,从而影响系统的吞吐量及误码率。

2 测试环境

2.1 无线传输信道仿真模型设计

无线传输信道仿真模型通过集成无线传输性能的关键影响因子,以时间为序,以相同时间间隔建立采样点,针对每个采样点计算列车所在的位置,按列车所在位置计算信道衰落系数,实现信道环境抽象和仿真模拟。具体设计步骤如下:

1)采用大尺度衰落模型仿真模拟列车在不同小区内运行时,列车与基站之间距离的变化造成的接收信号功率变化。由于市域铁路运行环境多处于建筑物分布稀疏区域,仿真模型选用 Rma(Rural Macro,农村宏站)场景,根据每个采样点列车所在的位置计算信道衰落系数。

2)采用小尺度衰落模型仿真模拟列车通过不同多径接收到信号功率的变化,具体包括不同路径的到达功率衰减值、到达时延、相位及到达方向角等参数。由于轨旁基站天线位置相对较高,列车可保持视距传输,仿真模型选用 CDL_D 场景,根据每个采样点列车所在的位置计算信道衰落系数。

3)以采样点为序,将大尺度衰落模型和小尺度衰落模型中每条路径的衰减值进行合并。

4)结合该采样点列车和基站之间的夹角计算多普勒频移,得到该采样点列车所在位置点的信道衰落系数,最终建立无线传输信道的 GBSM(基于几何的随机模型)。

2.2 测试环境搭建

按照上述仿真模型,使用信道仿真仪搭建测试环境。测试环境设置图如图 1 所示。设置 2 个相距 1 500 m 的基站,基站距离轨道的高度为 100 m;列车在直线轨道上运行,并实现在 2 个基站间切换,每秒建立 2 000 个采样点仿真信道衰减系数。

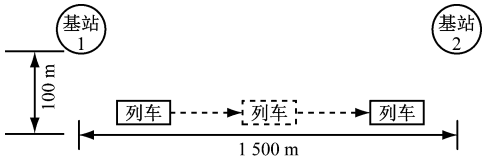


图 1 测试环境设置图

Fig. 1 Diagram of test environment settings

采用 BBU(基带单元)和 RRU(射频单元)组成基站,作为轨旁 LTE 发射接收端;采用核心网综合控制终端的入网及其数据的传输;采用 GPS(全球定位系统)完成系统的时钟同步;采用 TAU(列车接入终端)作为列车上 LTE 发射接收终端。测试平台架构图如图 2 所示。

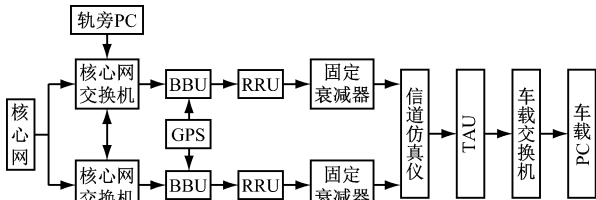


图 2 测试平台架构图

Fig. 2 Diagram of test platform architecture

本次测试中,LTE 系统上下行频率设置为 1 800 MHz,LTE 系统频宽设置为 5 MHz,小区双工模式采用 TDD(时分双工)制式,上下行子帧配比采用 SA1(上下行子帧配比为 2:2)模式,SSP(特殊子帧配比)采用 SSP7(特殊子帧配比为 10:2:2)的配比模式。

2.3 网络性能优化

列车高速运行环境下,多普勒效应、小区异常切换和信道多径急速变化等因素会影响无线信道的传输性能。本次测试针对上述关键影响因子分别采取相应措施对 LTE 系统网络性能进行优化。

1)多普勒效应:使用 AFC(自动频率校正)技术实现基站频率校正,基站通过测量终端的连续数据,快速测算基站与列车终端间由于多普勒效应带来的频率变化,动态跟踪、校正两者之间的频率偏差,补偿高速移动下多普勒效应引发的无线通信损

耗,以保证无线链路的稳定连接。

2)小区异常切换:通过降低测试上报间隔,实现及时反馈终端的信号接收功率,降低过早切换和过晚切换的可能性;通过限定系统进行同频切换,降低同频切换时间迟滞,从而降低切换时间;通过优化切换流程,降低基站和终端信令发送和处理时间,从而降低切换时间;通过优化重选参数,降低发生乒乓切换的可能性。

3)信道多径急剧变化:采用 AMC(自适应调制编码)技术更快地实现不同信噪比情况下编码方式的改变,降低在低信噪比情况下由于采用高速编码方式导致的误码率,同时也在高信噪比情况下及时采用高速编码方式增加吞吐量;采用 HARQ(混合自动重传请求)技术在无线链路层实现数据重传,降低丢包率;采用 QCI1(专用承载服务等级标识 1)在无线链路控制层实现数据重传,降低丢包率。

3 测试结果

为满足 CTCS2 + ATO(CTCS(中国列车运行控制系统),ATO(列车自动运行))的传输需求,无线传输需要满足:吞吐量大于 1 Mbit/s,最大时延小于 150 ms,平均丢包率小于 1%。本次测试分别在 160 km/h、180 km/h、200 km/h 及 250 km/h 等多种列车运行速度条件下,对无线传输的吞吐量、时延及丢包率等性能参数进行了测试。

3.1 吞吐量

随着列车运行速度改变,链路的吞吐量基本没有变化,但随着终端距离基站的位置不同,终端的吞吐量会受到较大影响。

上行链路最小吞吐量为 2.2 Mbit/s,最大吞吐量为 4.8 Mbit/s,最大吞吐量为最小吞吐量的 2 倍,测试结果如图 3 所示。

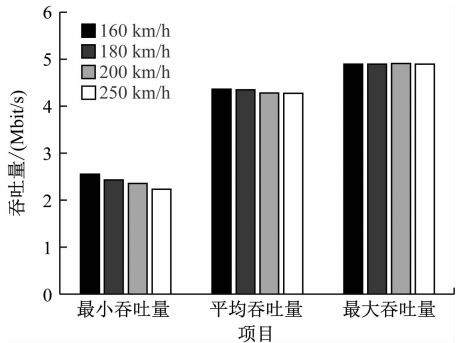


图 3 上行链路吞吐量

Fig. 3 Uplink throughput

下行链路最小吞吐量为 3.1 Mbit/s,最大吞吐量为 11.2 Mit/s,最大吞吐量为最小吞吐量的 3 倍,测试结果如图 4 所示。

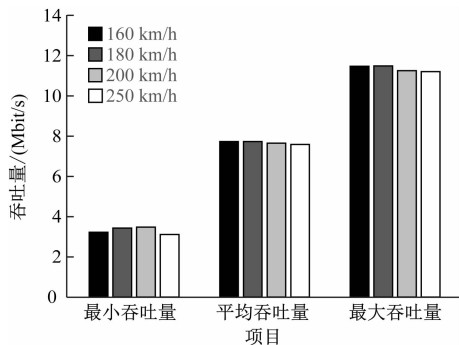


图4 下行链路吞吐量

Fig.4 Downlink throughput

测试结果表明:在不同的列车运行速度条件下,链路最小吞吐量均大于 1 Mbit/s,能够满足 CTCS2 + ATO 的传输需求。

3.2 时延

随着列车运行速度改变,链路的平均时延基本没有变化,但运行速度的提升会较大地影响链路的最大时延。

上行链路平均时延为 13 ms。列车运行速度为 160 km/h 时链路最大时延为 29 ms,而列车运行速度达到 250 km/h 时链路最大时延为 67 ms,约为 160 km/h 情况下的 2 倍。测试结果如图 5 所示。

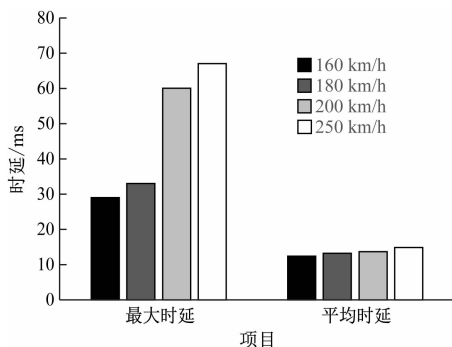


图5 上行链路时延

Fig.5 Uplink delay

下行链路平均时延为 16 ms。列车运行速度为 160 km/h 时链路最大时延为 24 ms,而列车运行速度达到 250 km/h 时链路最大时延为 64 ms,约为 160 km/h 情况下的 2 倍。测试结果如图 6 所示。

测试结果表明:在不同速率情况下,链路最大时延均小于 67 ms,能够满足 CTCS2 + ATO 的传输需求。

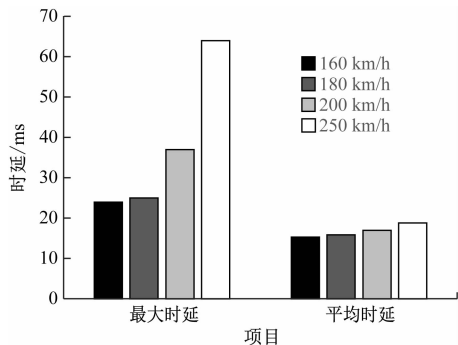


图6 下行链路时延

Fig.6 Downlink delay

3.3 丢包率

测试过程开启了 HARQ,传输业务数据采用了专用承载,且设置为 QCI1,在无线传输过程中出现的丢包通过重传的方式实现了弥补,从而丢包率均为 0,能够满足 CTCS2 + ATO 的传输需求。

4 结语

在市域铁路环境下,LTE 系统传输数据时面临的环境非常复杂,对传输性能影响巨大。信号系统是确保列车正常运行的关键业务,需要保证高性能的传输。本文分析了市域铁路环境下多普勒效应、小区异常切换及信道多径急速变化等关键影响因子的成因和对无线传输性能的影响,综合考虑大尺度衰落模型、小尺度衰落模型及多普勒效应,建立了基于 GBSM 的无线信道模型,针对各关键影响因子对 LTE 系统性能进行优化。架构测试平台,分别测试在 160 km/h、180 km/h、200 km/h 和 250 km/h 等列车运行速度条件下的无线传输性能参数。仿真测试结果验证了在市域铁路环境下 LTE 技术能够满足信号系统的传输需求,也可为后期工程实践提供指导。

参考文献

- [1] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS) [S]. Nice: ETSI,2021.
- [2] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[S]. Nice: ETSI,2019.
- [3] 李美艳. 基于 LTE 技术的高铁无线通信方案[J]. 广东通信技术, 2011(7):23.
LI Meiyuan. High-speed railway wireless communication scheme based on LTE technology[J]. Guangdong Communication Technology, 2011(7):23.

(下转第 119 页)

2) 环向施工缝。如图7所示,在车站2个墙体钢筋笼之间采用后插钢筋笼的施工工艺;现浇混凝土墙体无法预埋橡胶钢板止水带,可采用丙烯酸树脂遇水膨胀止水条+单组分聚氨酯遇水膨胀密封胶。

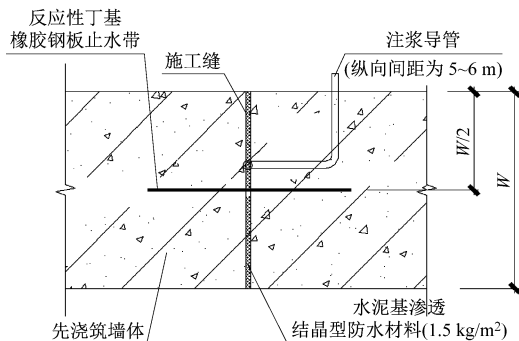


图7 环向施工缝节点大样

Fig. 7 Detail drawing of circumferential construction joint

3 结语

与当前国内外同类研究、同类技术相比,本文在地铁明挖装配整体式地下车站设计的多个方面的关键技术均有所创新:

1) 提出了一种适用于富含水地层带内支撑的明挖法施工装配叠合整体式地下车站的设计方案,有效解决了地铁装配式地下车站推广使用受限的问题。

2) 提出了采用单面预制外墙板的叠合结构型式,实现地铁地下车站预制装配及整体现浇的良好结合,提升了地铁地下车站装配叠合整体式建造技术。

3) 创造性地提出了地铁装配叠合整体式地下车站各构件新型环扣式节点的连接方案,解决了各预制构件之间有效连接问题。

4) 开展了地铁装配叠合整体式地下车站“半预制+半现浇叠合”结构的抗震计算理论及计算方法研究,填补了国内外在该方面的技术空白。

5) 提出了地铁装配叠合整体式地下车站整体及各构件在不同工况下受力性能研究计算的理论

及具体计算方法,填补了国内外在该方面理论设计及设计计算的空白。

地铁装配叠合整体式地下车站设计方案在南门站的应用,形成了从装配方案体系设计、预制构件设计及产业化生产、施工智能化管理、设备研发应用的全套技术方案。该方案可在南方广大富水区域的地铁地下车站设计及施工中推广使用,以减少对城市环境的污染。此外,该方案可缩短工期,减少施工对城市交通的不利影响,有效提高施工的机械化与自动化程度,降低人力成本,还有利于节约资源能源、提升劳动生产效率、促进建筑业与信息化工业的深度融合,促进建筑产业的转型升级。

参考文献

- [1] 杨秀仁,黄美群,林放. 地铁地下车站预制装配式结构注浆式榫槽接头弯曲抵抗作用特性研究[J]. 土木工程学报, 2020(2):33.
YANG Xiuren, HUANG Meiqun, LIN Fang. Research on bending resistance characteristics of grouted mortise-tenon joints for prefabricated metro station structures[J]. Journal of Civil Engineering, 2020(2):33.
- [2] 王德超,王国富,乔南,等. 预制装配式结构在地下工程中的应用及前景分析[J]. 中国科技论文, 2018(1):115.
WANG Dechao, WANG Guofu, QIAO Nan, et al. The application and prospect analysis of prefabricated construction in underground engineering[J]. China Science Paper, 2018(1):115.
- [3] 杜修力,刘洪涛,路德春,等. 装配整体式地铁地下车站侧墙底节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2017(4):38.
DU Xiuli, LIU Hongtao, LU Dechun, et al. Study on seismic performance of sidewall joints in assembled monolithic subway station[J]. China Civil Engineering Journal, 2017(4):38.
- [4] 杜修力,刘洪涛,许成顺,等. 不同轴压比作用下装配整体式地铁地下车站拼装柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018(11):11.
DU Xiuli, LIU Hongtao, XU Chenshun, et al. Experimental study on seismic performance of precast column in assembled monolithic subway station under different axial compression ratio[J]. Journal of Building Structure, 2018(11):11.

(收稿日期:2021-07-13)

(上接第114页)

- [4] 樊磊. 基于LTE技术的高铁无线通信覆盖分析[J]. 信息通信, 2014(3):177.
FAN Lei. High-speed railway wireless communication coverage analysis based on LTE technology[J]. Information & Communications, 2014(3):177.
- [5] 代光发,陈少平. 时变瑞利信道中存在频偏的OFDM系统性能分析[J]. 中南民族大学学报, 2008(2):63.
DAI Guangfa, CHEN Shaoping. Performance evaluation of OFDM

systems with residual carrier frequency offset over time-varying rayleigh channels[J]. Journal of South-Central Minzu University (Natural Science Edition), 2008(2):63.

- [6] 汪丁鼎,景建新,肖清华. LTE FDD/EPC网络规划设计与优化[M]. 北京:人民邮电出版社, 2020:58.
WANG Dingding, JING Jianxin, XIAO Qinghua. LTE FDD/EPC network planning, design and optimization[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2020:58.

(收稿日期:2022-01-13)