

# 小带宽下 LTE-M 系统承载 CBTC 业务能力分析\*

谢帅虎<sup>1</sup> 宋传旺<sup>1</sup> 李杰<sup>2</sup> 刘栋<sup>1</sup> 张守芝<sup>2</sup> 霍晓峰<sup>2</sup> 郝思媛<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学信息与控制工程学院, 266520, 青岛; 2. 青岛地铁集团有限公司, 266100, 青岛//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** 业内对 1.4 MHz 和 3 MHz 等小频谱带宽承载 CBTC(基于通信的列车控制)业务能力的研究报道不多。为了研究城市轨道交通车地综合通信系统(LTE-M)在小带宽下的业务承载能力,设计了基于 LTE(长期演进)技术的 LTE-M 系统,并在青岛地铁 2 号线进行实地测试。测试结果表明:在满足丢包率、时延等要求的条件下,车地无线通信系统在 1.4 MHz 和 3 MHz 带宽下可分别承载 3 路和 6 路 CBTC 业务。

**关键词** 城市轨道交通; 基于通信的列车控制; 长期演进; 车地通信

**中图分类号** U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.06.028

## Analysis of CBTC Service Carrying Capacity Loaded by LTE-M System under Low Bandwidth

XIE Shuaihu, SONG Chuanwang, LI Jie, LIU Dong, ZHANG Shouzhi, HUO Xiaofeng, HAO Siyuan

**Abstract** There are not many research works and reports on the communication based train control (CBTC) system loaded by 1.4 MHz bandwidth and 3 MHz bandwidth in the industry. In order to study the service carrying capacity of LTE-M system of urban rail transit under small bandwidth, the LTE-M system based on LTE technology is designed and tested on the spot of Qingdao metro Line 2. The results show that under the requirements of packet loss rate and delay, this system can carry 3 and 6 CBTC services under 1.4 MHz bandwidth and 3MHz bandwidth respectively.

**Key words** urban rail transit; CBTC; LTE; train-ground communication

**First-author's address** Institute of Information & Control Engineering, Qingdao University of Technology, 266520, Qingdao, China

目前,城市轨道交通 CBTC(基于通信的列车控制)系统车地传输技术主要采用 IEEE 802.11 系列

WLAN(无线局域网)方式。由于 WLAN 是开放的频段,所以存在同一频段民用设备对车地无线通信造成干扰的风险<sup>[1-2]</sup>。而 LTE(长期演进)技术采用了 ICIC(小区干扰协调)干扰抑制算法,具有很强的抗干扰能力,可有效减少同一频段民用设备干扰对车地通信系统的影响,弥补 WLAN 的不足<sup>[3]</sup>。

许多学者研究了 LTE 技术在 CBTC 系统中的应用。文献[4-7]认为利用 LTE 技术进行组网承载 CBTC 是可行的;文献[8-9]通过测试研究得出 TD-LTE(时分长期演进)系统具备承载 CBTC 的能力。而针对 1.4 MHz 和 3 MHz 等小频谱带宽承载 CBTC 业务能力的研究却鲜有报道。本文研究了 1.4 MHz 和 3 MHz 带宽下 LTE-M 系统对多路 CBTC 的承载能力,并在青岛地铁 2 号线进行实地测试。

## 1 CBTC 系统概述

CBTC 系统是通过车地之间传递列车速度、位置和移动授权等信息来实现对列车运行控制的系统。典型的 CBTC 系统结构如图 1 所示,系统设备主要包括地面设备和车载设备两部分。其中:地面设备包括 ATS(列车自动监控)系统、ZC(区域控制器)和联锁设备;车载设备包括车载 ATP(列车自动防护)和 ATO(列车自动运行)设备。

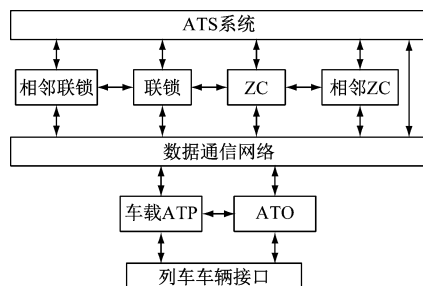


图 1 典型的 CBTC 系统结构

\* 国家自然科学基金青年项目(61701272); 青岛市轨道交通 LTE-M 系统综合承载研究项目(M4-ZX-2017-20)

CBTC 地面设备获得每一列车的状态、位置等信息后,计算出每一列车的移动授权,实时更新并发送给车载设备;车载设备则根据自身的运行状态和移动授权,计算出列车运行的速度/位置曲线,用以控制列车在一定速度限制和安全间隔下的安全运行<sup>[10-11]</sup>。车地通信业务应满足如下要求:① 单向传输时延不超过 150 ms;② 信息丢包率不超过 1%<sup>[12]</sup>。

## 2 CBTC 车地通信 LTE 组网方案

以青岛地铁 2 号线为例,LTE-M(城市轨道交通车地综合通信)系统采用 TD-LTE 技术,并采取双网冗余的设计方案,即 A 网和 B 网间相互独立,互不干涉。A 网是专门承载多路 CBTC 业务;B 网用来承载综合业务,包括 CBTC、PIS(乘客信息系统)、CCTV(闭路电视)、列车状态监控、紧急文本和集群调度等业务,其中 CBTC 的优先级最高。

承载 CBTC 信号系统的组网方案如图 2 所示,网元设备由核心网、BBU(基带处理单元)、RRU(射频拉远单元)和 TAU(列车接入单元)等组成,A 网和 B 网都可为 CBTC 信号系统提供独立的地面物理接口。其中:核心网是整个 LTE 系统的关键部分,主要用于提供双向数据服务,其设备安装在运营控制中心的机房内,与信号系统骨干网相连;基站相关设备 BBU 和 RRU 安放在车站机房内,RRU 与漏泄同轴电缆(以下简称“漏缆”)之间采用 POI(多系统接入平台)连接。漏缆敷设在隧道墙壁上,用以实现无线信号在行车区间的覆盖;车头和车尾

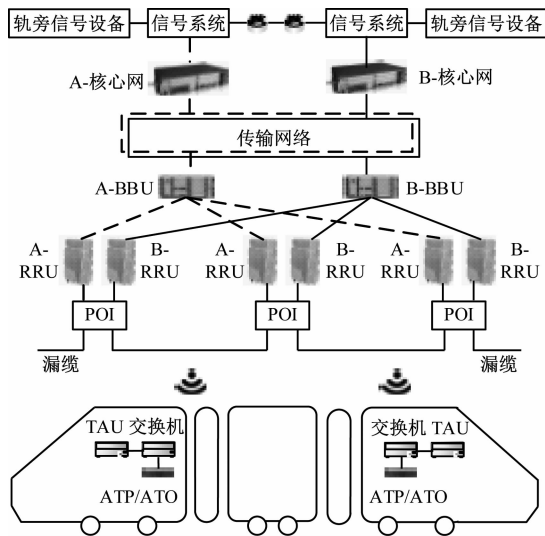


图2 承载CBTC信号系统的组网方案

均安装了TAU,TAU通过交换机与ATP/ATO等信号车载设备相连。

## 3 CBTC 车地通信系统模型分析

在城市轨道交通系统中,列车会在地下隧道和地面高架等多种场景穿梭行驶,因此有必要分别研究地下线路场景和高架线路场景LTE-M系统承载CBTC业务的能力。列车从源小区行驶至目标小区的过程中,会有一段两小区信号交叉的区域(即切换区)。综合考虑切换区长度和驻足末端场强条件下允许的最大链路损耗,得到相邻两个RRU间的最大间距,即单个小区最大覆盖距离为1 240 m。为便于计算,本文取1.3 km。根据CBTC各信号厂家的实际配置,CBTC上下行传输速率均小于100 kbit/s,考虑一定的信息传输余量,本文将其速率配置为120 kbit/s。按照青岛地铁2号线的远期规划,列车在初期、近期和远期的最小发车间隔分别为5 min、3 min和2 min,本文按2 min间隔进行分析。

### 3.1 地下线路场景

地下线路场景下,LTE一个小区覆盖上/下行单向线路,以上行线路举例说明。

1) 如图3所示,当列车的最高运行速度为80 km/h时,列车从距离乙站站台0.65 km处(A点)持续运行并减速至0后停在站台(B点),根据制动曲线计算可得列车的运行时间为45 s;列车在乙站的停站时间为40 s;列车零速启动,加速运行至驶出距离站台0.65 km处(C点)时,根据加速度曲线可得列车的运行时间为53 s。由此可得,在一个LTE小区内列车的总运行时间为138 s,则在该小区的覆盖区段内单运行方向最多可有2列列车。

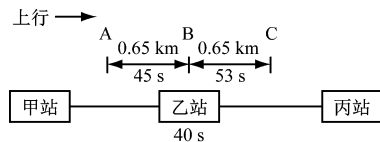


图3 一个LTE小区的列车运行时间

2) 当列车以30 km/h限速运行时,列车从A点持续运行并减速停稳在B点的运行时间为96 s;列车在乙站的停站时间为60 s;列车自B点启动运行至C点的运行时间为98 s,则列车在一个LTE小区总运行时间为254 s,则该小区的覆盖区段内单运行方向最多可有3列列车。

3.2 高架线路场景

高架线路场景下,一个 LTE 小区需要覆盖上下行双向线路。当列车的最高运行速度为 80 km/h 时,可求得单向最多可有 2 列列车,则上下行双方向最多可有 4 列列车。当列车在区间限速 30 km/h 时,可求得单向最多可有 3 列列车,则上下行双方向最多可有 6 列列车。

4 系统性能分析

在青岛地铁 2 号线上行线路的某 3 站 2 区间搭建测试环境,A 网和 B 网带宽分别设置为 1.4 MHz 和 3 MHz。

4.1 场强覆盖测试与分析

根据地下隧道线路的实际走向情况,该 3 站 2 区间的距离分别为 906.5 m 和 1 070.87 m。信号场强覆盖性能测试结果如表 1 所示,可知 1.4 MHz 带宽下 RSRP(参考信号接收功率)最小值为 -92 dBm,3 MHz 带宽下 RSRP 最小值为 -94 dBm。两个带宽下 RSRP 的最小值均不低于 -95 dBm<sup>[12]</sup>,这表明 RRU 的安装间隔满足 LTE-M 系统的规范要求。

表 1 两个带宽下的 RSRP 测试结果统计 dBm			
带宽	RSRP		
	最小值	最大值	平均值
1.4 MHz	-92.0	-53.0	-68.7
3 MHz	-94.0	-55.0	-71.3

4.2 区间吞吐量测试与分析

使用 Ixchariot 软件测试 1.4 MHz 和 3 MHz 带宽下的上下行区间吞吐量。从图 4~7 和表 2 的测试结果可以看出:① 带宽越大,其上下行吞吐量越大,这是因为带宽所配置的资源块越高,系统吞吐能

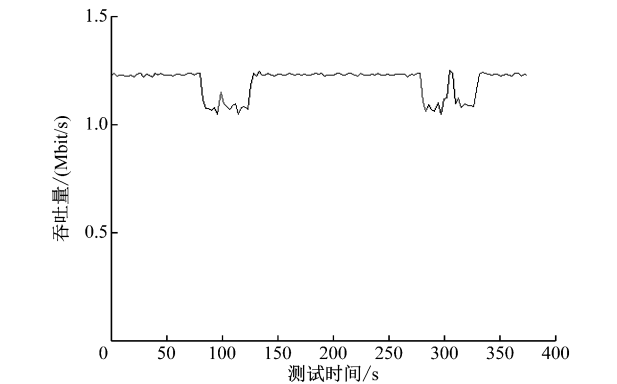


图 4 A 网 1.4 MHz 上行区间吞吐量测试结果

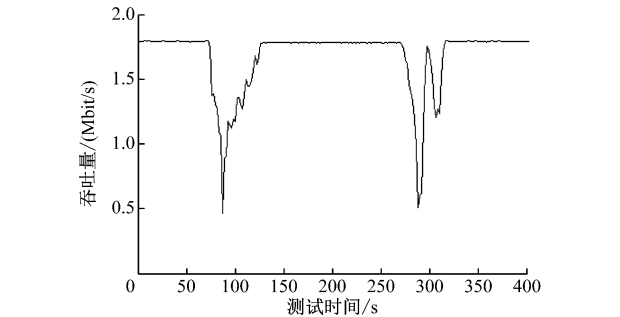


图 5 A 网 1.4 MHz 下行区间吞吐量测试结果

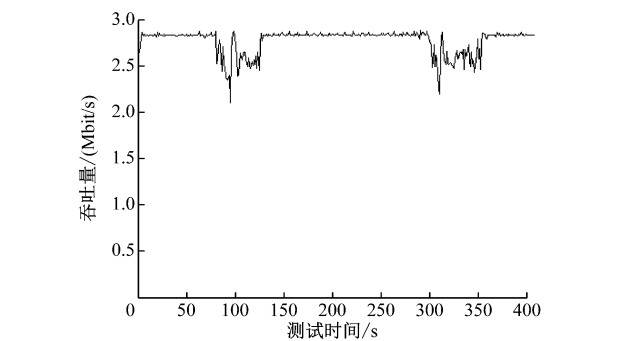


图 6 B 网 3 MHz 上行区间吞吐量测试结果

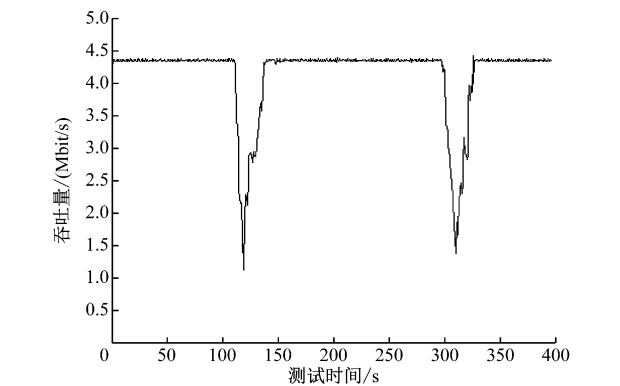


图 7 B 网 3 MHz 下行区间吞吐量测试结果

表 2 区间吞吐量测试结果统计 Mbit/s			
区间	吞吐量		
	最小值	最大值	平均值
1.4 MHz 上行区间	1.04	1.25	1.19
1.4 MHz 下行区间	0.47	1.80	1.61
3 MHz 上行区间	2.10	2.87	2.76
3 MHz 下行区间	1.12	4.42	3.99

力越强;② 图中的吞吐量急剧降低是由于列车经过切换区时,车载终端 TAU 需要重新关联和鉴权入网,产生较大的通信延迟,因而系统吞吐量急剧降低。切换完成后,无线链路恢复正常,吞吐量提升到切换前的水平;③ 对比带宽吞吐量最小值与平均值的差值,可得出下行差值比上行大许多的结论,

其原因在于现场采用单漏缆、单天线组网的方式导致下行接收功率失衡,对下行的传输速率造成了影响。

4.3 CBTC 业务测试

由上文上下行区间吞吐量测试结果可知,A 网 1.4 MHz 和 B 网 3 MHz 上下行区间吞吐量最小值分别为0.47 Mbit/s 和 1.12 Mbit/s。若 CBTC 业务传输速率按 120 kbit/s 设置,则根据吞吐量最小值计算出 1.4 MHz 和 3 MHz 带宽理论上至少应可分别承载 3 路和 6 路 CBTC 业务。

为了验证两种带宽下多路 CBTC 时延和丢包率能否满足系统要求,本文使用 Ixchariot 软件模拟多路 CBTC 业务,设置传输速率为 120 kbit/s,测试多路 CBTC 的时延和丢包率。3 路 CBTC 和 6 路 CBTC 的丢包率测试结果均为 0%,时延测试结果如表 3~4 所示。可以看出,3 路 CBTC 的最大时延为 71.5 ms,6 路 CBTC 最大时延为 77.0 ms。对比表 3 和表 4,可发现 1.4 MHz 和 3 MHz 带宽下的整体最小时延很接近,但 3 MHz 带宽下的平均时延比 1.4 MHz 带宽下的有所增加。两个带宽下的最大时延均远小于 150 ms,满足系统的要求。

表 3 1.4 MHz 带宽下 CBTC 时延测试结果 ms

序号	最大时延	平均时延	最小时延
1	65.0	20.5	13.5
2	67.0	20.5	13.5
3	71.5	20.5	13.5

表 4 3 MHz 带宽下 CBTC 时延测试结果 ms

序号	最大时延	平均时延	最小时延
1	64.5	23.5	13.5
2	71.5	23.5	13.0
3	74.0	23.5	13.5
4	70.0	23.5	13.0
5	77.0	23.5	13.5
6	74.0	23.5	13.0

5 结语

本文针对小带宽下 LTE-M 系统承载 CBTC 能力进行测试分析,得到以下结论:①1.4 MHz 带宽下,在满足丢包和时延的条件下,系统可承载 3 路

CBTC 业务;②3 MHz 带宽下,在满足丢包和时延的条件下,系统可承载 6 路 CBTC 业务。

由此,在最小带宽 1.4 MHz 的情况下,LTE-M 系统可满足单小区 3 路 CBTC 业务的承载需求。CBTC 测试方案假设了多辆车在同一小区同时漫游切换,而真实应用中多辆车(特别是两辆以上)同时发生漫游切换的概率极低,这就说明该 LTE 网络性能完全能够满足 CBTC 系统需求的要求,且具有时延小、丢包率低和稳定性高的优点。本文的研究对未来城市轨道交通系统 CBTC 的规划设计具有一定的参考价值。

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] WANG Y G, LI Z, ZHAO H L. Handover performance test and analysis in TD-LTE based CBTC train ground communication systems[C]// IEEE. 2017 Chinese Automatic Congress. Jinan: IEEE, 2017:3655.

[3] 张成国,李文明.长期演进(LTE)技术在地铁无线通信中的应用[J].城市轨道交通研究,2015(1):112.

[4] 张建明.城轨交通 CBTC 车-地无线通信的分析与思考[J].现代城市轨道交通,2014(1):47.

[5] 贾萍,徐淑鹏.TDD-LTE 技术在中国城市轨道交通 CBTC 系统中应用[J].城市轨道交通研究,2015(12):113.

[6] 黄云玲.LTE 在中国城市轨道交通 CBTC 信号系统车地无线通信的应用[J].铁路技术创新,2016(6):91.

[7] 刘茜倩,何晶,陈玉江.基于无线通信的轨道交通 CBTC 技术分析[J].数字技术与应用,2017(8):10.

[8] 施运涛,廖梦婕.TD-LTE 应用于 CBTC 车地通信系统的可行性研究[J].铁路通信信号工程技术,2014,11(6):47.

[9] 吴承诚.卡斯柯完成以 CBTC 为核心业务的 LTE-M 综合承载测试[J].中国铁路,2016(9):5.

[10] ZHU L, YU F R, NING B, et al. Communication-based train control (CBTC) systems with cooperative relaying: design and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 63(5):2162.

[11] 步兵,唐涛.传输时延对 CBTC 影响的分析及消除[J].铁道学报,2014(6):41.

[12] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会.城市轨道交通装备技术规范:CZJS/T 0061—2016 [S].北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会,2016:1.

(收稿日期:2018-06-21)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt1998.com