doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.06.007

5G 网络切片技术 160 千米速度级信号系统业务传输能力研究

阮小飞[1,2]，廖志斌[1,2]，付　嵩[1,2]，魏国栋[3]
（1. 中国铁道科学研究院集团有限公司，北京 100081；2. 广州铁科智控有限公司，广州 510000；
3. 北京交通大学自动化与智能学院，北京 100044）

摘　要：针对目前车地综合通信业务需求的不断增长和频率资源受限的问题，对 5G 网络切片技术在车地无线通信架构下进行信号系统业务传输的方案开展研究。首先，分析目前车地综合通信业务的需求和传输系统现状，提出利用 5G 网络切片技术解决问题的可行性；然后，从网络方案和切片方案两个方面进行系统设计；最后以信号系统车地业务传输为例，在广州地铁 18 号线上，进行 160 km/h 速度场景下，信号系统业务传输实验验证。研究结果表明：物理资源块(physical resource block，PRB)预留切片时延小于 150 ms 的概率较普通切片高 7.94%，达到 99.87%，丢包率较普通切片低 1.47%，达到 0.08%；PRB 预留+服务质量(quality of service，QoS)的切片时延低于 150 ms 的比例达到 99.99%，而丢包率下降为 0，证明了 5G 网络切片配置 PRB 预留和增加 QoS 能够满足信号系统业务的传输需求。研究成果可以为 160 km/h 速度场景下信号系统业务在 5G 网络中传输提供参考。

关键词：城市轨道交通；信号系统；5G；网络切片；传输能力；160 km/h
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)06-0048-07

Research on the Signal System Data Transmission Capability at 160 km/h Speed Level Using 5G Network Slicing Technology

RUAN Xiaofei[1,2], LIAO Zhibin[1,2], FU Song[1,2], WEI Guodong[3]
(1. China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100081;
2. Guangzhou Railway Sciences Intelligent Controls Co., Ltd., Guangzhou 510000;
3. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: In view of the growing demand for vehicle-ground integrated communication services and the limitation of frequency resources, this study investigates 5G network slicing technology for signal system business transmission under the vehicle-ground wireless communication architecture. First, the study analyzes the requirements of the current vehicle-ground integrated communication services and the status of the transmission system, and proposes the feasibility of using 5G network slicing technology to address these issues. Second, the system is designed from two aspects: network scheme and slicing scheme. Finally, taking the vehicle-ground business transmission of the signal system as an example, an experimental verification of the signal system business transmission at the 160 km/h speed was conducted on Guangzhou Metro Line 18. The results show that

收稿日期：2025-04-29　修回日期：2025-05-22
第一作者：阮小飞，男，硕士，副研究员，从事铁路通信信号技术研究，ruanxiaofei@gzrsic.com
通信作者：廖志斌，男，硕士，副研究员，从事铁道通信信号技术研究，lzb_216511@163.com
基金项目：国家自然科学基金项目(52372310)；广州市科技计划项目(2024A03J0761)；广州铁科智控有限公司技术研究(KYA23002)
引用格式：阮小飞，廖志斌，付嵩，等. 5G 网络切片技术 160 千米速度级信号系统业务传输能力研究[J]. 都市快轨交通，2025，38(6)：48–54.
RUAN Xiaofei, LIAO Zhibin, FU Song, et al. Research on the signal system data transmission capability at 160 km/h speed level using 5G network slicing technology[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(6): 48–54.

compared with the PRB reserved slice, the probability of the PRB reserved slice with a delay less than 150ms is 7.94% higher than that of the ordinary slice, reaching 99.87%, and the packet loss rate is 1.47% lower than that of the ordinary slice, reaching 0.08%; The percentage of PRB reservation+QoS slice delay less than 150ms has increased to 99.99%, while the packet loss rate has decreased to 0. 5G network slice configuration PRB reservation and increasing QoS can meet the service transmission requirements of the signal system. The research results can provide reference for the transmission of signal system services in 5G networks at 160 km/h.
Keywords: urban rail transit; signal system; 5G; network slicing; transmission capability; 160 km/h

城市轨道交通作为高效、安全、环保的公共交通工具，在国家交通体系中占据越来越重要的地位。城市轨道交通一般使用无线通信技术承载列车与地面设备间的通信，实现列车自动运行。目前，城市轨道交通车地无线通信网络，技术上主要使用了 WLAN 技术和 LTE-M 技术，目前新建线路均以 LTE-M 技术为主。WLAN 技术频率上为 2.4 GHz 和 5.8 GHz 这两个公共频段，易受乘客及公共空间的信号的干扰。LTE-M 使用的 1.8 GHz 频段是工信部批准给交通、电力和石油等行业建立专用通信网和公众通信网设立的，使用时需要当地无线电管理机构规划和批准，干扰小但频率资源紧张，传输能力受限。

城市轨道交通信号系统的通信需求主要包括车地间列车控制信息的双向实时传输，列车调度信息，车厢及轨旁视频监控回传，乘客信息系统(passenger information system，PIS)的实时视频、信息和灾害应急发布等内容。新需求包括高速大容量应用、远程运营维护、大规模设备监控、设备在线监测等。目前城市轨道交通信号系统的无线通信系统繁多，一方面新增无线通信系统费用高昂，网络系统运营维护专业程度过高，维护人员培训困难，运营单位呼吁通信系统精简合并，但另一方面，专用通信系统带宽受限，难以拓展大带宽业务应用。

近年来，以 5G 技术为代表的软件功能虚拟化[1]、网络切片[2]和边缘计算技术[3]的发展，实现了在一套硬件上通过软件配置，实现多个专用网络的技术，通过专用切片或业务优先级，能够达到专网通信的效果。此外，5G 网络使用运营商频段，不需要申请专用频率，规避了开放频率面临的干扰和专用频率面临的带宽短缺的问题。在建设费用上，能够节省大量地面设备的投入，极大降低了成本。因此，使用 5G 网络承载城市轨道交通的车地传输业务具有巨大的发展潜力。

许多专家学者结合城市轨道交通对运营商 5G 公网进行了深入研究。李士东等[4]在频率使用和组网方案两方面提出了 5G 技术在城市轨道交通中的应用参考；刘为俊[5]研究了城市轨道交通中 5G 网络的覆盖方案，对隧道区域、地面区域和室内区域不同场景下的无线覆盖方式进行了分析；蒋海林等[6]分析了 5G 通信系统的关键技术及在城市轨道交通车地通信环境中的适用性，认为 LTE-M 加 5G 的方案是未来城市轨道交通车地通信建设的可行方案；王琰[7]从地铁新线和既有线改造两方面，提出 5G 公网建设的整体思路，并列举了郑州地铁、京港地铁、杭州地铁在部分线路通过 5G 网络为乘客提供网络服务的实际案例；陈琦[8]使用 5G 技术监测城市轨道交通车地设备状态，取得了良好效果。

5G 技术虽然在城市轨道交通应用上已经取得多项研究成果，具有丰富的技术积累和应用案例，但是仍未有承载城市轨道交通信号系统业务的案例。本文提出应用 5G 网络承载城市轨道交通信号系统业务的方案，并进行了传输性能测试，验证了方案的可行性。

1 信号系统业务需求

城市轨道交通车地综合通信系统业务主要包括列车运行控制业务、列车紧急文本下发业务、列车运行状态监督业务、IMS 视频监控业务和 PIS 视频业务，其中信号系统业务主要为列车运行控制业务。在 LTE-M 系统的需求规范[9]中，对城市轨道交通列车在自动运行等级 3(grade of automation 3，GoA3)或 GoA4 运营场景下，规定了车地主要业务的需求，其中列车运行控制业务的传输优先级和时延要求最高，如表 1 所示。

在城市轨道交通运行场景下，LTE-M 系统的站间距可达到 1.2 km，LTE-M 规范[9]要求一个小区内支持最多 6 列车的通信，综合承载多种业务时，单个小区需要传输的最小上下行业务量约为 15 Mbit/s。

LTE-M 采用 1.8 GHz 专用频段(1785～1805 MHz)共 20 MHz。表 2 是 LTE-M 系统在不同带宽、不同时隙配比、支持 MIMO 等条件下单小区上下行理论峰值速率，该数据是在无线条件良好、无相邻小区干扰的情况下计算得出的[10]。对照表 2，在采用双漏缆覆盖、时隙配比为 0(1DL∶3UL)、5 MHz 频率组网等条件下，单小区的理论峰值速率为下行 12.75 Mbit/s、上行 8.12 Mbit/s。实际无线环境下 LTE 系统传输速率难以

表 1 城市轨道交通车地业务需求

Table 1 Urban rail transit vehicle-ground data transmission demand

业务名称	QoS 需求			上行传输速率/(kbit/s)	下行传输速率/(kbit/s)	传输时延/ms
	QCI	优先级	资源类型			
列车运行控制业务	1	2	GBR	512	512	<150
列车紧急文本下发业务	2	4	GBR	-	10	<300
列车运行状态监督	2	4	GBR	32～104	1	<300
IMS 视频监控业务	6	6	Non-GBR	2048	-	<500
PIS 视频业务	6	6	Non-GBR	-	2 048～8 192	<500
单列车速率合计	-	-	-	2 592～2 664	2 571～8 715	-
六列车速率合计	-	-	-	15.19～15.61 Mbps	15.06～51.06 Mbps	-

表 2 LTE-M 系统带宽速率

Table 2 LTE-M system bandwidth rate Mbit/s

系统带宽/M	下行			上行		
	TDD 配比 0	TDD 配比 1	TDD 配比 2	TDD 配比 0	TDD 配比 1	TDD 配比 2
3	7.72	12.15	16.58	4.80	3.20	1.60
5	12.75	20.08	27.42	8.12	5.41	2.70
10	25.63	40.31	54.99	16.42	10.95	5.48

达到理论值。因此现有频率条件下，无法实现双网综合承载需求，实践中往往采用 10 MHz+3 MHz 划分双网实现车地无线系统，其中 10 MHz 用于综合承载，3 MHz 仅承载信号系统业务。

除以上业务外，无线通信系统后续还将承载车车通信场景，智能化运营场景，故障疏散等新增运营场景的车地无线通信业务。现有 LTE-M 通信系统已经难以满足后续业务的增长需求。5G 技术的大带宽能够满足不同行业的终端接入，其切片技术使得专业用户能够通过共享基础设施实现专用通信，通过配置保障策略，具备传输实时性要求高的城市轨道交通信号系统业务的潜力。

信号系统业务的关键传输需求整理为：①单向传输时延不超过 150 ms 的概率不小于 98%，不超过 2 s 的概率不小于 99.92%；②单向丢包率不超过 1%，通信中断时间不超过 2 s 的概率不小于 99.99%；③列车上行和下行传输速率不小于 512 kbit/s；④切换成功率不小于 99.92%。

2 系统方案

2.1 网络方案

城市轨道交通信号系统的车地通信网络分为有线传输系统和无线传输系统。在 5G 网络承载车地业务传输方案中，有线传输系统包括接入 5G 网络的多接入边缘计算(multi-access edge computing，MEC)云平台和信号系统有线专用冗余网络，无线传输系统包含车载的无线接入单元和 5G 无线通信系统。

5G 网络系统结构如图 1 所示，列车接入单元(train access unit，TAU)部署于列车两端接入 5G 无线网络；无线传输系统由 5G 网络构成；MEC 云平台分别接入 5G 网络、信号系统的有线专网 A 和专网 B；MEC 云平台经过防火墙与信号专业有线专网连接，防火墙配置隔离策略阻断非信号系统业务的接入；地面信号系统有线专网由双网冗余的骨干网组成，信号区域控制器(zone controller，ZC)设备，联锁设备，列车自动监控(automatic train supervision，ATS)设备均接入有线专网。5G 网络与信号系统专网之间使用 MEC 云平台进行接口，并配置防火墙实现业务隔离和访问控制。MEC 云平台作为业务网关根据综合通信类别将数据传输到不同地面网络中，信号系统业务则传输至结构图中的信号系统有线专用冗余网络中。

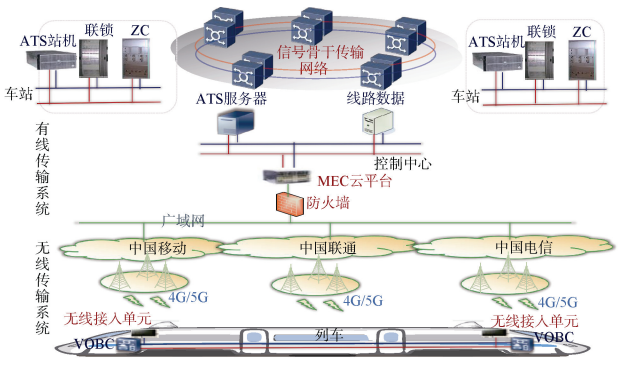


图 1 系统结构

Figure 1 System architecture diagram

2.2 切片方案

网络切片是 3GPP 在 5G 中的关键特性之一，相比服务质量(quality of service，QoS)，网络切片最大的特点是端到端的隔离。传统 QoS 虽然实现了一定程度的隔离，但只是核心网内部的隔离，属于“小隔离”。而网络切片横向贯穿了接入网、承载网和核心网，从整个网络上进行隔离，是“大隔离”。

当无线接入单元或地面业务网关距离核心网物理距离较远或经过网络节点个数较多时，将产生较大时延。利用 MEC 下沉方式部署切片网络，可实现用户面数据处理服务部署到目标城市轨道交通线路控制中心，缩短了通信距离，减少了网络节点，从而降低用户的传输时延；此外，切片终端接入基站后，由切片终端归属的数据网络标识(data network name，DNN)，与 MEC 的用户面功能(user plane function，UPF)之间通过 5G DNN 进行分流[11]，将业务数据留在本地，数据信息不会经过互联网，进一步提高了数据安全性。因此，使用 MEC 和网络切片技术实现虚拟专网具备满足城市轨道交通车地业务需求的潜力。

轨道交通的切片方案如图 2 所示，专用切片使用 DNN 技术在专用终端和 MEC 间建立连接，通过 VPN 通道与城市轨道交通系统进行网络连接。其中 MEC 包括多接入边缘节点协同平台(multi-access edge-compupting platform，MEP)和 UPF。UPF 作为基站和数据网络之间的互连点，根据 5G DNN 完成用户平面的 GRPS 隧道协议(GPRS tunneling protocol-user plane，GTP-U)协议的封装和解封装。MEP 通过本地接入数据网络(local area data network，LADN)实现流量调度与本地分流，避免回传至核心网，降低时延，并进行 QoS 保障。列车运行过程中将不断切换小区，信令面的切换控制信令需回传至 5G 核心网络(5G Core，5GC)的接入和移动性管理功能(access and mobility management function，AMF)实体，但用户面的车地传输业务仍然通过相同的 UPF 与本地数据网络间互联。

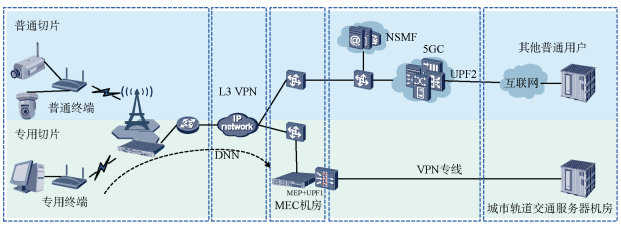


图 2 切片方案

Figure 2 Slicing scheme

5G无线空口资源可从时隙和频域两个方面划分为不同的资源块，其中频域方向划分的资源单元为 12 个连续子载波组成的物理资源块(physical resource block，PRB)，PRB 预留方案是为特定业务组分配固定 PRB，用于承载组内各切片的所有业务。不同切片的数据承载(data radio bearer，DRB)映射到不同 PRB 的方案，可实现数据在物理上的安全隔离，获得高可靠性业务传输能力。相对于共享 PRB 资源的 QoS 切片，PRB 预留切片能够实现无线频谱资源的硬隔离。

信号系统业务是地铁最新高优先级业务，关系到行车安全，对网络安全隔离、可靠性要求非常高，因此，使用切片时，必须预留一定比例的 PRB 资源，保障城市轨道交通分区切片专网的带宽资源。此外，城市轨道交通本身存在各种业务，在预留的 PRB 基础上还需要增加 QoS 保障，将不同业务通过不同 5G 服务质量标识(5G QoS identifier，5QI)进行管理，优先保障安全业务。此外，5G 技术应用场景中的超高可靠、低时延类通信(ultra-reliable low-latency communications，uRLLC)的资源类型为 Delay-critical GBR 类型，5QI 为 82～90，其最大传输速率的 5QI 为 90，传输速率为 6.3 kbit/s[12]，无法满足表 1 中城市轨道交通车地业务的速率需求。因此，按照城市轨道交通业务传输需求，参考 LTE 网络的 QoS 分类标识(QoS class identifier，QCI)规划，5QI 的规划如表 3 所示。

表 3 城市轨道交通车地业务需求 QoS 规划

Table 3 QoS design for urban rail transit vehicle ground data transmission demand

业务名称	5G 网络 QoS 需求			4G 网络 QoS 需求		
	5QI	优先级	资源类型	QCI	优先级	资源类型
列车运行控制业务	1	20	GBR	1	2	GBR
列车紧急文本下发业务	2	40	GBR	2	4	GBR
列车运行状态监督	2	40	GBR	2	4	GBR
IMS 视频监控业务	6	60	Non-GBR	6	6	Non-GBR
PIS 视频业务	6	60	Non-GBR	6	6	Non-GBR

3 现场测试

在广州地铁 18 号线番禺广场站至冼村站区间建设 5G 实验网，开展承载信号系统车地无线通信业务的现场实验，测试列车通过 5G 网络接入真实的信号系统地面网络并按照实际运营场景进行实验。广州地铁 18 号线为已开通线路，最高运行时速为 160 km/h，全线均

在地下，沿线使用天线进行 5G 网络覆盖。为满足城市轨道交通信号系统业务高可靠、低时延的传输需求，5G 实验网采用了结合 PRB 预留和 QoS 优先级的切片技术。

3.1 网络接入

测试使用的 5G 网络采用中国移动 n79 频段资源(4.8～4.9 GHz)作为工作频段，频宽 100 MHz，实验网无线信号覆盖洗村站至番禺广场站区间(共 26.7 km)及陇枕停车场出入段线的右线区域。UPF 和 MEC 设备部署在广州地铁 18 号线番禺广场站；BBU 设备部署在番禺广场站、南村万博站、石榴岗站、琶洲西区站和洗村站设备室；在番禺广场站到广州东站区间单侧隧道外侧约每 400 m 部署 RRU，每个 RRU 在左右两个方向连接贴壁天线，天线紧贴隧道壁安装，与车载终端天线的位置高度基本一致，保证收发天线端到端无遮挡。

5G 实验网络的结构如图 3 所示，UDM 为统一数据管理，NRF 为网络存储库功能，NSSF 为网络切片选择功能，SMF 为会话管理功能，AMF 为接入和移动管理功能，PCF 为控制策略功能，这些均为 5G 核心网功能模块。列车的 5GTAU 通过专用 DNN 发起会话建立请求，由 SMF 根据 5GTAU 提供的专用 DNN 以及所在的跟踪区域(tracking area，TA)选择 UPF，完成边缘协议数据单元(protocol data unit，PDU)会话的建立，接入与边缘 UPF 对接的 MEC 平台。MEC 使用网络功能虚拟化基础设施(network functions virtualization infrastructure，NFVI)将硬件资源虚拟化，实现 MEC 所需要的 UPF 和 MEP 功能；MEP 的主要功能为路由和 QoS 保障，其中应用功能(application function，AF)组件实现路由及策略控制功能；连接服务(connectivity service，COS)组件实现数据的本地卸载，确保 AF 的

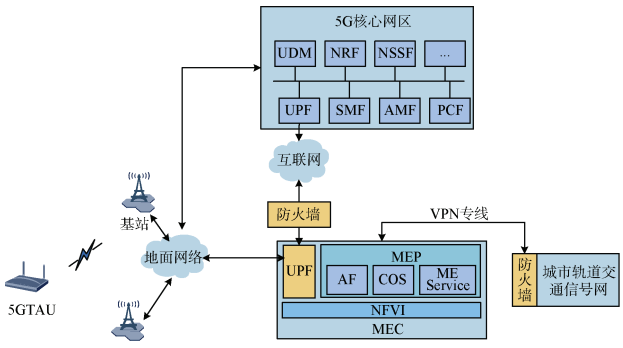


图 3 5G 实验网络结构

Figure 3 5G experimental network architecture

流量被正确路由到边缘，避免回传至核心网；移动边缘服务(mobile edge service，ME Service)是 MEP 平台的基础服务集合。MEC 与城市轨道交通信号网之间通过防火墙建立虚拟专用网络(Virtual Private Network，VPN)，保障数据的安全。

测试通过信号系统专网和 5G 实验网互通实现列车与地面设备间的通信，并且仅有测试列车通过 5G 实验网与地面设备通信。

测试系统网络规划如图 4 所示。测试列车在司机室新增信号接口设备、5GTAU 和天线，由信号接口设备与既有车载设备进行连接。地面信号系统专用网络通过网关交换机与 5G 实验网的防火墙进行连接，并对测试车辆指定路由。通过该规划，仅有测试列车会通过 5G 网络与地面设备连接，其他列车仍然经由 LTE 的专网与地面信号网络连接，将实验风险降到最低。

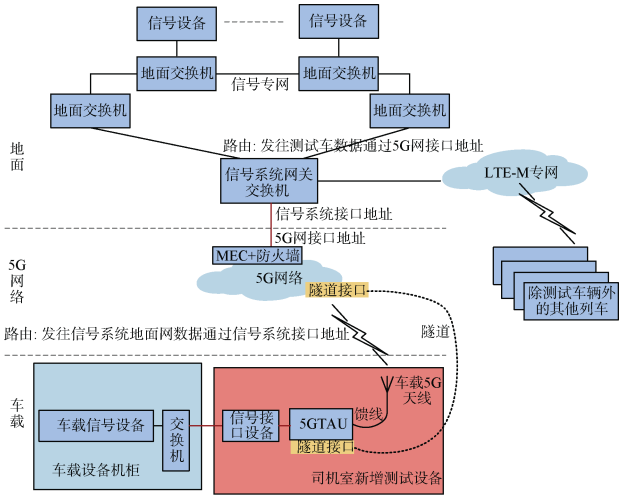


图 4 测试系统网络规划

Figure 4 Experimental system network design

3.2 测试结果

测试列车按照最高运营时速 160 km/h 以自动驾驶(automatic train operation，ATO)模式运行，运行过程中同时传输信号系统业务和其他车地综合通信业务。测试时，对番禺广场至南村万博区间 31 和 33 小区、磨碟沙站至洗村站区间 47 小区进行速率限制，分别对 PRB 预留和 QoS 进行了组合测试。

3.2.1 普通切片方式

5G 网络信号系统业务的切片配置为无 RPB 预留，信号系统业务和其他车地综合通信业务的 5QI 均为 6。列车通过既有 LTE-M 专网传输信号系统数据，以 ATO 模式运行，仅对 5G 网络进行信号系统业务模拟测试。

普通切片方式单程时延测试结果如图 5 所示，信号系统业务平均时延 48.8 ms，最高时延 2 088 ms，最低时延 7 ms，高于 150 ms 时延的数据包 980 包，高于 2 s 时延的数据包 3 包；其中在 31，33 小区中，平均时延 384 ms，47 小区前段平均时延 232 ms；发送数据 12 337 包，丢失数据包 191 包，丢包率为 1.55%；通信中断时间超过 2 s 的位置为 1 处。

3.2.2 PRB 预留切片方式

5G 网络信号系统业务的切片配置为网络包括 5% 的 RPB 预留，信号系统业务和其他车地综合通信业务的 5QI 均为 6。列车通过既有 LTE-M 专网传输信号系统数据，以 ATO 模式运行，仅对 5G 网络进行信号系统业务模拟测试。

PRB 预留方式单程时延测试结果如图 6 所示，信号系统业务平均时延 13.35 ms，最高时延 390 ms，最低时延 7 ms，高于 150 ms 时延的数据包 16 包，高于 2 s 时延的数据包 0 包；发送数据 11 966 包，丢失数据包 9 包，丢包率为 0.08%。

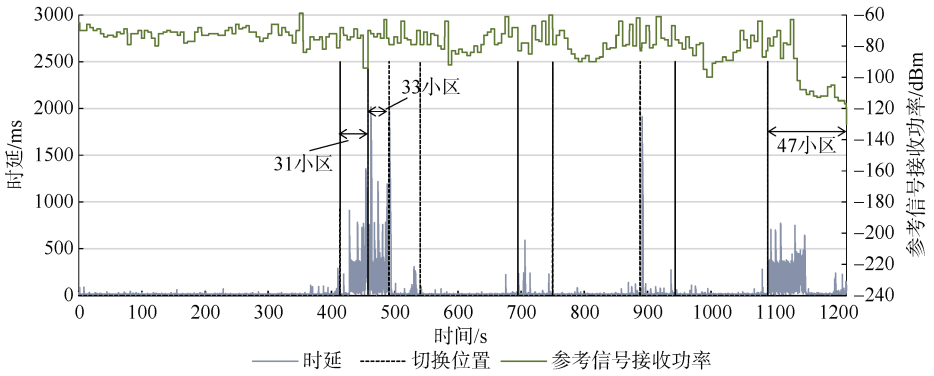


图 5　普通切片方式单程时延测试结果

Figure 5　Results of single-way delay test using ordinary slicing method

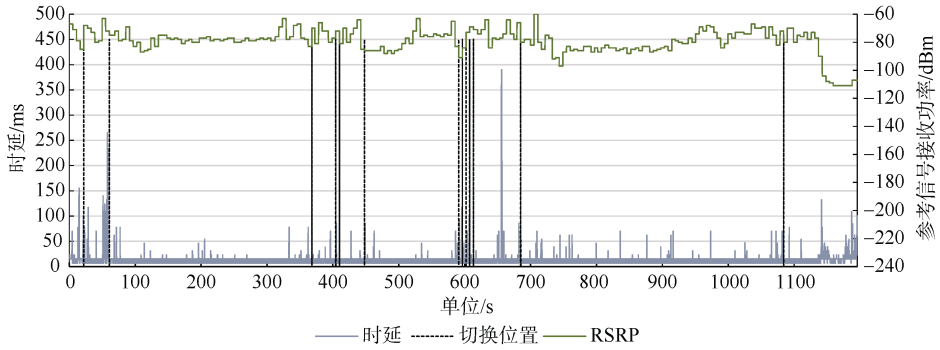


图 6　PRB 预留方式单程时延测试结果

Figure 6　Single-way delay tests using PRB reservation method

3.2.3 PRB 预留+QoS 切片方式

5G 网络信号系统业务的切片配置为网络包括 5% 的 RPB 预留，信号系统业务 5QI 为 1，其他车地综合通信业务 5QI 为 6。列车使用 5G 切片网络承载信号系统业务，以 ATO 模式运行。

PRB 预留+QoS 方式单程时延测试结果如图 7 所示，平均时延 8.13 ms，最高时延 163 ms，最低时延小于 1 ms，高于 150 ms 时延的数据包 1 包，高于 2 s 时延的数据包 0 包；发送数据 15 717 包，丢失数据包 0 包，丢包率为 0%。

信号系统业务在 5G 网络拥塞场景下，配置普通切片、PRB 预留切片和 PRB 预留+QoS 切片这 3 种方式的无线性能测试结果统计如表 4 所示，在网络拥塞时普通切片有两项指标未能满足信号系统的通信需求，分别是时延小于 150 ms 的概率和单程丢包率；采用 PRB 预留方式后，在网络拥塞时相比普通切片，平均时延降低了 35.45 ms，降幅达到 72.64%，小于 150 ms 的概率提升了 7.94%，达到 99.87%，丢包率从 1.55% 降低为 0.08%，极大提升了传输性能，满足了信号系统业务的传输性能需求；当采用 QoS 策略提高信号系统

业务优先级后，与 PRB 预留方式相比，信号系统业务的传输性能得到明显提升，其中平均时延下降了 5 ms，提升了 39%，低于 150 ms 的数据包提高了 0.12%，达到 99.99%，丢包率从 0.08%降低为 0。

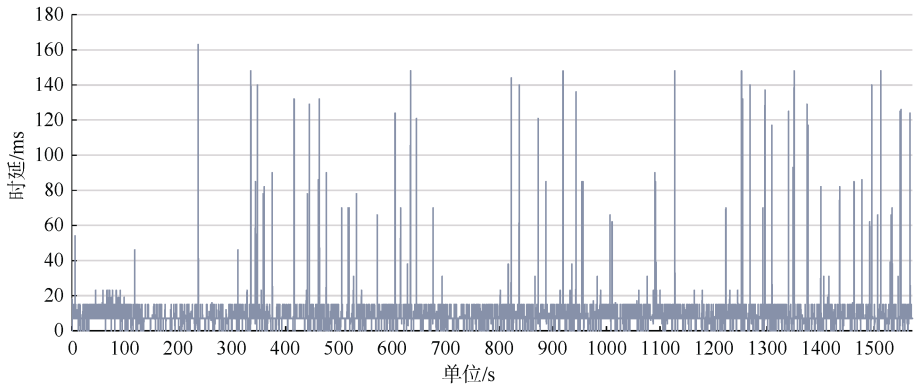


图 7　PRB 预留+QoS 方式单程时延测试结果

Figure 7　Single-way delay tests using PRB reservation & QoS

表 4　测试结果统计

Table 4　Statistical table of experiment results　%

指标	时延<150 ms的概率	时延<2 s的概率	单程丢包率	通信中断时间<2 s的概率	切换成功率	切换成功率
需求	≥98	≥99.92	≤1	≥99.99	≥99.92	≥99.92
普通切片	91.93	99.97	1.55	99.99	100.00	100.00
PRB 预留	99.87	100.00	0.08	100.00	100.00	100.00
PRB 预留+QoS	99.99	100.00	0.00	100.00	100.00	100.00

4　结论

城市轨道交通发展迅速，车地无线综合类业务不断增长，为探索 5G 网络承载车地综合通信业务的场景下信号系统业务的传输问题，本文在实际线路上使用 5G 实验网搭建切片网络进行测试，得出如下结论：

1) 5G 网络使用普通切片网络承载信号系统业务时，在速率限制的信道拥塞场景下小于 150 ms 时延的概率为 91.93%，未达到信号系统业务要求的大于 98%的标准；丢包率为 1.55%，未达到信号系统业务要求的不超过 1%的标准。因此，无法满足城市轨道交通信号系统的传输需求。

2) 与普通切片网络相比，5G 网络使用 PRB 预留切片网络承载信号系统业务，在相同速率限制的信道拥塞场景下，小于 150 ms 时延的概率达到 99.97%，丢包率降低为 0.08%，均优于信号系统业务需求，能够满足城市轨道交通信号系统的传输需求；

3) 与 PRB 预留切片网络相比，5G 网络使用 PRB 预留+QoS 切片网络承载信号系统业务，时延及丢包率进一步下降，小于 150 ms 时延的概率提高到 99.99%，丢包率降低为 0，进一步提升了信号系统业务的承载能力。

参考文献

[1] 梁俊斌, 黄少东, 吴旭, 等. 绿色移动边缘网络中可靠的虚拟网络功能部署技术研究[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(12): 3521-3528.
LIANG Junbin, HUANG Shaodong, WU Xu, et al. Research on reliable virtual network function deployment technology in green mobile edge networks[J]. Application research of computers, 2023, 40(12): 3521-3528.

[2] 田晨景, 谢钧, 曹浩彤, 等. 5G 网络切片研究进展[J]. 计算机科学, 2023, 50(11): 282-295.
TIAN Chenjing, XIE Jun, CAO Haotong, et al. Research developments of 5G network slicing[J]. Computer science, 2023, 50(11): 282-295.

[3] 杨守义, 陈怡航, 张双玲, 等. 面向未来移动通信的移动边缘计算研究综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(4): 1-10.
YANG Shouyi, CHEN Yihang, ZHANG Shuangling, et al. Research of mobile edge computing for future mobile communications: a review[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(4): 1-10.

[4] 李士东, 戴克平. 5G 在城市轨道交通行业中的应用分析[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(7): 89-93.
LI Shidong, DAI Keping. Analysis on application of 5G in urban rail transit[J]. Railway signalling & communication, 2020, 56(7): 89-93.

（下转第 82 页）

[5] ZHAI X Q, WANG X L, WANG T, et al. A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 22: 108-120.
[6] NAZIR H, BATOOL M, BOLIVAR OSORIO F J, et al. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: a review[J]. International journal of heat and mass transfer, 2019, 129: 491-523.
[7] FARAJ K, KHALED M, FARAJ J, et al. Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: a review[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2020, 119: 109579.
[8] 李沐, 李亚溪, 李传常. 相变储冷技术及其在空调系统中的应用[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(1): 180-197.
LI Mu, LI Yaxi, LI Chuanchang. Phase-change cold storage technology and its application in air conditioning systems[J]. Energy storage science and technology, 2023, 12(1): 180-197.
[9] ZHU Na, HU Pingfang, LEI Yu, et al. Numerical study on ground source heat pump integrated with phase change material cooling storage system in office building[J]. Applied thermal engineering, 2015, 87: 615-623.
[10] CHEN Xiaoming, ZHANG Quan, ZHAI Zhiqiang, et al. Performance of a cold storage air-cooled heat pump system with phase change materials for space cooling[J]. Energy and buildings, 2020, 228: 110405.
[11] CUI Jingtan, WANG Shengwei. A model-based online fault detection and diagnosis strategy for centrifugal chiller systems[J]. International journal of thermal sciences, 2005, 44(10): 986-999.
[12] JIN Guangyu, CAI Wenjian, LU Lu, et al. A simplified modeling of mechanical cooling tower for control and optimization of HVAC systems[J]. Energy conversion and management, 2007, 48(2): 355-365.
[13] 张青. 中央空调系统节能运行控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
ZHANG Qing. Research on energy-saving operation control method of central air conditioning system[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

（编辑：王艳菊）

（上接第 54 页）

[5] 刘为俊. 城市轨道交通 5G 公专网无线覆盖方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(4): 206-210.
LIU Weijun. Research on urban rail transit 5G public-private network wireless coverage scheme[J]. Urban mass transit, 2024, 27(4): 206-210.
[6] 蒋海林, 邵颖霞, 赵红礼. 5G 通信系统在城市轨道交通车地通信中的应用分析[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(2): 42-47.
JIANG Hailin, SHAO Yingxia, ZHAO Hongli. Application of 5G communications system in urban rail train wayside communications[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(2): 42-47.
[7] 王琰. 5G 通信技术在城市轨道交通中的应用研究[J]. 铁道通信信号, 2023, 59(9): 53-58.
WANG Yan. Research on application of 5G communication technology in urban rail transit[J]. Railway signalling & communication, 2023, 59(9): 53-58.
[8] 陈琦. 基于 5G 技术的城市轨道交通车地数据转储方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 23-26.
CHEN Qi. Research on vehicle-wayside data dump scheme of urban rail transit based on 5G technology[J]. Urban mass transit, 2022, 25(1): 23-26.
[9] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通车地综合通信系统(LTE-M)总体规范 第 1 部分: 系统需求: T/CAMET 04005.1—2018[S]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2018.
China Association of Metros. Long term evolution for metro (LTE-M)—Generic specification Part 1: System requirements: T/CAMET 04005.1—2018[S]. Beijing: China Association of Metros, 2018.
[10] 毛磊, 翟浩杰, 尹尚国. 5G 在轨道交通行业的应用探讨[J]. 移动通信, 2020, 44(1): 63-70.
MAO Lei, ZHAI Haojie, YIN Shangguo. Discussion on the application of 5G in the rail transportation industry[J]. Mobile communications, 2020, 44(1): 63-70.
[11] 程玉松, 王少波, 何丽华, 等. 5G 垂直行业全网性专用业务落地方案[J/OL]. 电信科学, 2024. doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024101.
CHENG Yusong, WANG Shaobo, HE Lihua, et al. Implementation plan for full network specialized services in the 5G vertical industry[J/OL]. China Industrial Economics, 2024. doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024101.
[12] 3GPP TS 23.501. System architecture for the 5G system: ETSI TS 123 501[S]. 2022.

（编辑：王艳菊）